



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

**ULOŽENÍ ROTORŮ TURBODMYCHADEL NA
PLYNOVÝCH LOŽISCÍCH**

TURBOCHARGER ROTORS USING GAS BEARINGS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Sembol

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Tomáš Sembol**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Uložení rotorů turbodmychadel na plynových ložiscích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zaměřuje na možnou aplikaci plynových ložisek v oblasti rotorů turbodmychadel osobních a nákladních automobilů. Předpokládá se, že student získá znalosti o existujících konstrukčních řešeních v obdobných aplikacích a ve výpočtových a experimentálních metodách sloužících k návrhu plynových ložisek. Jednotlivé poznatky vyústí v návrh možných konstrukčních úprav existujících rotorů využívající kluzná nebo valivá ložiska.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Rešerše technických řešení dané problematiky
- 2) Přehled výpočtových a experimentálních metod řešících danou problematiku
- 3) Návrh konstrukčních úprav stávajících turbodmychadel

Seznam literatury:

HEISLER, Heinz. Advanced engine technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995. ISBN 1-56091-734-2.

STACHOWIAK, Gwidon W. a Andrew W. BATCHELOR. Engineering Tribology. 3. vyd. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 0-7506-7836-4.

VANCE, John M. Rotordynamics of Turbomachinery. 1. vyd. New York: Wiley, 1988. ISBN 978-0-471-80258-7.


STONE, Richard. Introduction to internal combustion engines. 3. vyd. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers, 1999. ISBN 0768004950

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 1. 11. 2016



prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Kalolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá rešerší zaměřenou na uložení rotoru turbodmychadel na plynových ložiscích. Práce je rozdělena do sedmi kapitol. V první části je stručně shrnuta historie vývoje přeplňování spalovacích motorů. Druhá část popisuje základní principy fungování turbodmychadla a možnosti jeho regulace. Třetí část se zabývá konstrukcí jednotlivých částí i turbodmychadla jako celku. Čtvrtá část je věnována popisu konstrukce, technických řešení a aplikací aerodynamických ložisek. V páté a šesté kapitole jsou vysvětleny některé výpočtové a experimentální metody a v poslední kapitole je uveden výčet potřebných konstrukčních úprav stávajících turbodmychadel.

KLÍČOVÁ SLOVA

turbodmychadlo, ložisková skříň, rotor, uložení, ložisko, plynová ložiska, aerodynamická ložiska, ložisko s kapsami, ložisko se spirálními drážkami, LNS, fóliová ložiska

ABSTRACT

This bachelor's thesis is a research project focused on turbocharger rotors using gas bearings. The work is divided into seven chapters. The first chapter is brief summary of history of development of turbochargers for combustion engines. Basic working principles of turbocharger are described in second chapter. Third chapter is about the construction of individual parts, as well as about the turbocharger as a whole. The fourth part is devoted to the design, technical solutions and applications of aerodynamic bearings. The fifth and sixth chapter explains some of computational and experimental method. The final chapter lists required structural modifications of existing turbochargers.

KEYWORDS

turbocharger, bearing housing, rotor, mounting, bearing, gas bearings, aerodynamic bearings, rayleigh step bearing, spiral groove bearing, linear pad bearing, foil bearings

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEMBOL, T. *Uložení rotorů turbodmychadel na plynových ložiscích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 47 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Tomáš Sembol

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Pavel Novotný, Ph.D za jeho cennou kritiku, odborné vedení a ochotu při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině, známým a kamarádům za jejich neustálou podporu při studiu i v soukromém životě.

OBSAH

1.	Úvod	9
1	Historie turbodmychadel	10
2	Princip fungování	11
2.1	Prodleva turbodmychadla	11
2.2	Regulace tlaku Turbodmychadla	12
2.2.1	Regulace tlaku pomocí obtokového ventilu Waste Gate.....	12
2.2.2	Regulace tlaku pomocí proměnlivé geometrie lopatek VGT/VNT.....	13
3	Konstrukce turbodmychadla.....	15
3.1	Turbínová část.....	16
3.2	Kompresorová část	17
3.3	Ložisková část.....	18
3.3.1	Valivá kuličková ložiska	18
3.3.2	Kluzná kapalinová ložiska s plovoucím pouzdrům	19
3.3.3	Plynová ložiska.....	21
4	Aerodynamická ložiska	22
4.1	Radiální aerodynamická ložiska	22
4.1.1	Ložisko s kapsami	22
4.1.2	Ložisko se spirálními drážkami.....	22
4.1.3	Fóliová ložiska.....	23
4.1.4	Ložiska s naklápěcími segmenty (LNS).....	24
4.2	Axiální aerodynamická ložiska.....	26
4.2.1	Axiální fóliová ložiska	27
4.2.2	Axiální ložiska se spirálními drážkami	27
4.3	Aplikace aerodynamických ložisek	28
4.3.1	Expanzní turbína pro zkapalňování hélia	28
4.3.2	Rychloběžná dmychadla.....	28
4.3.3	Letadlové klimatizační jednotky	29
4.3.4	Gyroskopy	30
4.3.5	Cirkulační dmychadla jaderných reaktorů.....	30
4.3.6	Další aplikace aerodynamických ložisek.....	31
5	Výpočetní metody	33
5.1	Ložisko s naklápěcími segmenty (LNS).....	33
5.2	Axiální ložisko s kapsami	35
6	Experimentální metody.....	37
6.1	Turbodmychadlová testovací stolice	37

6.1.1	Měřič kroutícího momentu	37
6.1.2	Měření třecích ztrát.....	38
6.1.3	Měření axiálního zatížení	39
7	Konstrukční úpravy stávajících turbodmychadel	40
7.1	Konstrukční úprava rotoru	40
7.2	Konstrukční úprava ložiskové skříně.....	41
8	Závěr.....	42
	Souhrn.....	43
	Použité informační zdroje.....	44
	Seznam použitých zkratek a symbolů	47

1. ÚVOD

Přeplňování spalovacích motorů je historicky téměř stejně staré jako samy spalovací motory. Za tu dobu prošla turbodmychadla značným vývojem, kdy se od uplatnění v těžkých lodních a kamionových motorech prosadila až do osobních a užitkových automobilů, kde jsou s velkou popularitou aplikována čím dál více. V dnešní době již prakticky stěží najdeme v nabídce kteréhokoli z výrobců motor nepřepřplňovaný turbodmychadlem. Avšak stále přísnější emisní normy, neustálá honba za nižší spotřebou, nižšími ztrátami a vyšší účinností si žádá nová a lepší řešení.

Stejně jako vývoj spalovacích motorů, musí jít s dobou také vývoj turbodmychadel. Po dlouhou dobu se používalo konvenční uložení rotoru turbodmychadel na kluzných, dnes převážně valivých, kapalinou mazaných ložisek. Ovšem všechna výše zmíněná fakta nutí výrobce turbodmychadel k vývoji nového, v jiných aplikacích již funkčního a spolehlivého řešení.

Uložení rotoru na plynových ložiscích je technologie, která si našla své uplatnění v mnoha aplikacích. Použití aerodynamických ložisek pro uložení rotoru turbodmychadla přináší velký potenciál a řadu výhod, ale také obtíží, se kterými se konstruktéři budou muset vypořádat. Podaří-li se všechny tyto problémy odstranit a technologii postupně odladit, může se jednat o velmi významný milník v historii vývoje turbodmychadel.

1 HISTORIE TURBODMYCHADEL

Historie přeplňování je téměř stejně stará jako historie spalovacích motorů. Už na přelomu 19. a 20. století se pánové Gottlieb Daimler a Rudolf Diesel zajímali o možnost zvýšení výkonu a snížení spotřeby paliva spalovacích motorů stlačováním vzduchu nasávaného motorem. První turbodmychadlo poháněné výfukovými plyny z motoru vyvinul dr. Alfred J. Büchi mezi lety 1909 - 1915. V roce 1915 také navrhl první prototyp pro dieselové spalovací motory, avšak jeho nápad se nesetkal s ohlasem. Ovšem ve 30. letech 20. století se dr. Büchi dočkal úspěchu a jeho turbodmychadlo se objevilo v nákladních lodích firmy Saurer. Tento úspěch přiměl dr. Büchiho prodat licenci na výrobu turbodmychadel, což umožnilo vývoj nových technologií, konstrukcí a materiálů turbodmychadel. [1]

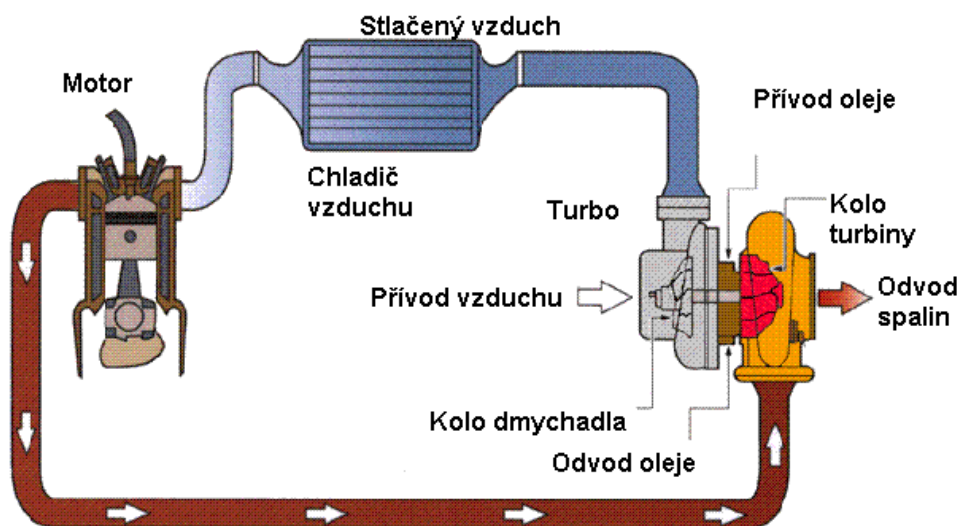
V 50. letech 20. století firmy Cummins, Scania a Volvo zahajují výrobu nákladních automobilů s dieselovými motory osazenými turbodmychadly. V roce 1954 Volvo představuje první turbodmychadlem přeplňovaný nákladní automobil, který dosahuje výkonu 185 koní oproti své atmosférické verzi s výkonem 150 koní. V roce 1962 se objevily vozy Chevrolet Corvair Monza a Oldsmobile Jetfire, které byly prvními osobními automobily vybavené přeplňováním. Ovšem kvůli jejich nízké spolehlivosti nezaznamenaly větší úspěch. [2]

Významný úspěch turbodmychadel nastal až v roce 1973 po konci první ropné krize. Téměř každá automobilka má v nabídce model s přeplňovaným motorem, z důvodu nedokonalé technologie šlo převážně o nákladní vozy s dieselovými motory. Další dramatický průlom nastal v roce 1978, kdy Mercedes představil první osobní automobil osazený přeplňovaným dieselovým motorem. Jednalo se o model 300 SD. Následován byl Volkswagenem, který v roce 1981 uvedl na trh model Golf s motorem 1.6 Turbo Diesel. To předznamenalo další éru přeplňování. [2]

Dnes jsou turbodmychadla na velice vysoké technologické úrovni a jejich vývoj probíhá ve velké míře i nadále. Vysoký výkon a snižování emisí škodlivých sloučenin jsou důvodem, že turbodmychadla se stala nedílnou součástí většiny motorů a to jak benzínových, tak dieselových. Důležitým milníkem se stal systém VNT (Variable nozzle turbine), vyvinutý firmou Honeywell. Tento systém umožňuje téměř okamžitou změnu směru a rychlosti plynů proudících na turbínové kolo, čímž je dosaženo plynulého řízení plnicího tlaku a dochází k odstranění prodlevy turbodmychadla v nízkých otáčkách motoru. [1]

2 PRINCIP FUNGOVÁNÍ

Turbodmychadlo je dmychadlo poháněné výfukovými plyny. Dmychadlo se skládá z kompresorové a turbínové části. V turbínové části se nachází turbínové kolo, které je spojeno mechanicky pomocí hřídele s kompresorovým kolem. Výfukovými plyny proudícími z motoru je roztáčeno turbínové kolo, které skrze hřídel roztáčí kompresorové kolo. To stlačuje vzduch proudící do motoru a výrazně tak zvyšuje jeho objemovou účinnost oproti klasickému nepřepřihňovanému motoru. Může se tedy do motoru, potažmo jeho válců, dopravit více objemu paliva a zachovat stejný, tzv. stechiometrický poměr směsi (u benzinových 14,7:1 kg a u dieselových motorů 14,5:1 kg – poměr vzduchu a paliva) při stejných otáčkách. Dojde tedy k reakci většího molárního množství plynů, to způsobuje významný nárůst výkonu a kroutícího momentu motoru, při zachování zdvihového objemu i vnějších rozměrů motoru. Ve válcích ovšem vzniká vysoký tlak, který zvyšuje mechanické namáhání hlavních dílů motoru. Turbodmychadla obvykle dosahují účinnosti okolo 80%. [3]



Obr. 1 Schéma přepřihňovaného motoru [4]

Při stlačování vzduchu proudícího do motoru dochází ke značnému zahřívání, což je nevýhoda, neboť teplota palivové směsi je limitujícím faktorem, zejména u benzinových motorů. Příliš vysoká teplota směsi může zapříčinit její samovznícení a následně detonační hoření ještě před řízeným zapálením jiskrou od svíčky. Vyšší teplota nasávané směsi pro oba typy motorů znamená snížení jejich účinnosti. Proto se pro chlazení nasávaného vzduchu používá mezichladič (tzv. intercooler). Stlačený vzduch je v mezichladiči chlazen buď vzduchem z okolního prostředí, nebo kapalinou s vlastním okruhem. Teplota stlačeného vzduchu se před ochlazením přibližně okolo 130 °C, teplota po ochlazení nejčastěji bývá v rozmezí 50 – 60 °C. [5]

2.1 PRODLEVA TURBODMYCHADLA

Prodleva turbodmychadla je známý nežádoucí jev, často slangově označován jako „turbefekt“. Prodlevou trpí pouze motory automobilů přepřihňované turbodmychadlem. Je to doba uplynulá mezi sešlápnutím plynového pedálu a ostrým nástupem výkonu motoru, který je způsoben roztočením lopatek turbodmychadla. Turbína ve výfukovém potrubí vytváří překážku. Aby bylo možno tuto překážku překonat, musí dojít k nárůstu tlaku výfukových plynů a překonání

momentu setrvačnosti rotoru turbodmychadla. Nárůst tlaku probíhá v určitém časovém intervalu, který vytváří onu prodlevu. [5]

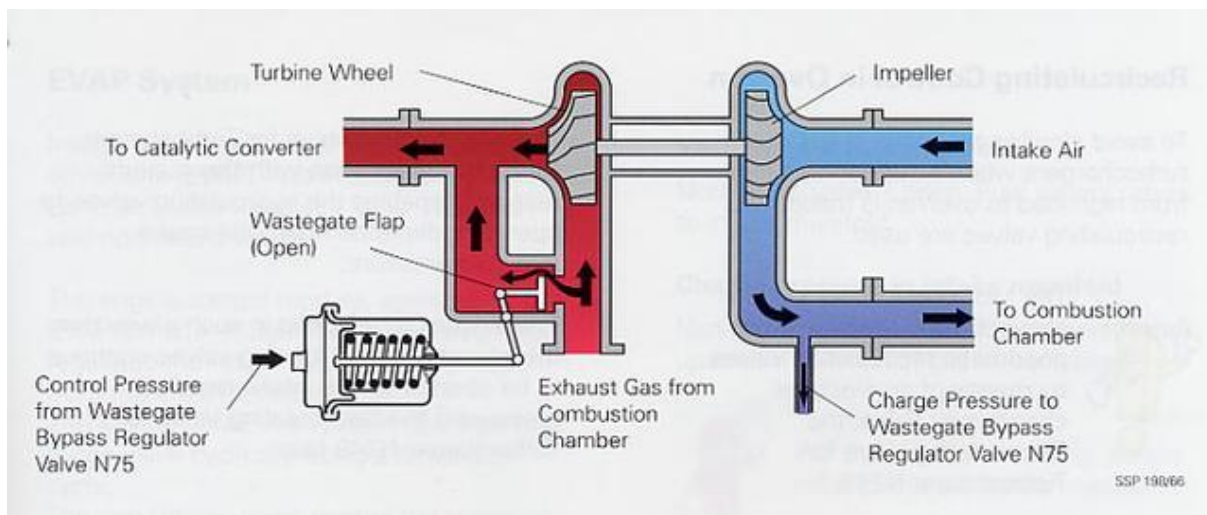
Prodlevu lze zkrátit několika způsoby. Například zmenšením, nebo použitím lehčích materiálů rotujících částí lze snížit moment setrvačnosti rotoru. Namísto fluidních ložisek je možno použít valivá kuličková ložiska, která snižují tření. Dalším způsobem je užití dvou menších turbodmychadel namísto jednoho velkého. Jedno z nich pracuje v celém spektru otáček a druhé z nich až ve vyšších otáčkách. Také je možno užít dvou turbodmychadel tak, aby každé z nich dodávalo stlačený vzduch jedné polovině válců. U vidlicových motorů bývá užito dvou turbodmychadel tak, že ke každé řadě válců náleží právě jedno turbodmychadlo. Vedení stlačeného vzduchu poté bývá svedeno do jednoho potrubí již před mezichladičem, jako je tomu například u vozu Renault Safrane Biturbo. Závodní okruhové vozy ve velké míře využívají systém ALS (anti lag system), který funguje tak, že po ubrání plynu dojde ke vstřiku paliva do výfukového potrubí těsně před turbodmychadlo. Palivo se vznítí, dojde k nárůstu tlaku a nedochází k poklesu otáček rotoru turbodmychadla, což zabraňuje vzniku prodlevy. Pro tyto vozy jsou typickým projevem plameny šlehající z výfuku. [5]

2.2 REGULACE TLAKU TURBODMYCHADLA

Regulace tlaku je velice důležitým prvkem, a to hned z několika důvodů. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1, turbodmychadlo má určitou prodlevu, tu nelze úplně odstranit, ale do jisté míry ji lze eliminovat právě regulací. Při nízkých otáčkách motoru je všechen tlak výfukových plynů soustředěn na turbínu, aby došlo k jejímu včasnému roztočení. Naopak při vysokých otáčkách motoru je tlak ve výfukovém potrubí příliš vysoký, proto se jeho část musí odvést mimo turbínové kolo, aby nedošlo k překročení maximálních otáček turbodmychadla a jeho následnému poškození. Dalším důvodem je plnicí tlak turbodmychadla. Regulace je zde důležitá proto, aby byl při určitých otáčkách dodržen patřičný plnicí tlak, což má značný vliv na plynulost nástupu výkonu a kroutícího momentu motoru. Moderním trendem je dosáhnout co nejvyššího kroutícího momentu při co nejnižších otáčkách. Dnešní přepínávané motory tak dosahují maximálního kroutícího momentu již okolo 2000 min^{-1} . Důležité je také to, aby nedošlo k překročení maximálního plnicího tlaku a případnému poškození sání, nebo jiných mechanických částí motoru.

2.2.1 REGULACE TLAKU POMOCÍ OBTOKOVÉHO VENTILU WASTE GATE

Jedná se o pasivní regulaci obtokovým ventilem (anglicky by-pass), která reaguje na změnu zatížení. Řídící jednotka vyhodnocuje údaje, jako je poloha škrtící klapky, klepání motoru, množství a teplota nasávaného vzduchu, a srovnává je s charakteristikami v řídící jednotce motoru. Systém je nastaven tak, aby byl zajištěn maximální plnicí tlak při maximálním kroutícím momentu motoru. Dojde-li k dalšímu navýšení množství výfukových plynů, plnicí tlak nabyde mezních hodnot, to indikuje snímač tlaku v sání a řídící jednotka provede zásah pomocí podtlakového aktuátoru, nebo akčního členu REA (Rotary Electric Actuator), který dle potřeby otvírá, či zavírá obtokový ventil, a reguluje tím množství a tlak plynů proudící na turbínu. Plynů proudící skrze ventil jsou vedeny přímo do výfukového potrubí. Při použití tohoto řešení je odezva na sešlápnutí plynového pedálu velice rychlá. Nevýhodou je ovšem vyšší protitlak ve výfukovém potrubí, což zhoršuje vyprazdňování válců motoru, zvyšuje mechanické ztráty a zvyšuje spotřebu. [6], [7].

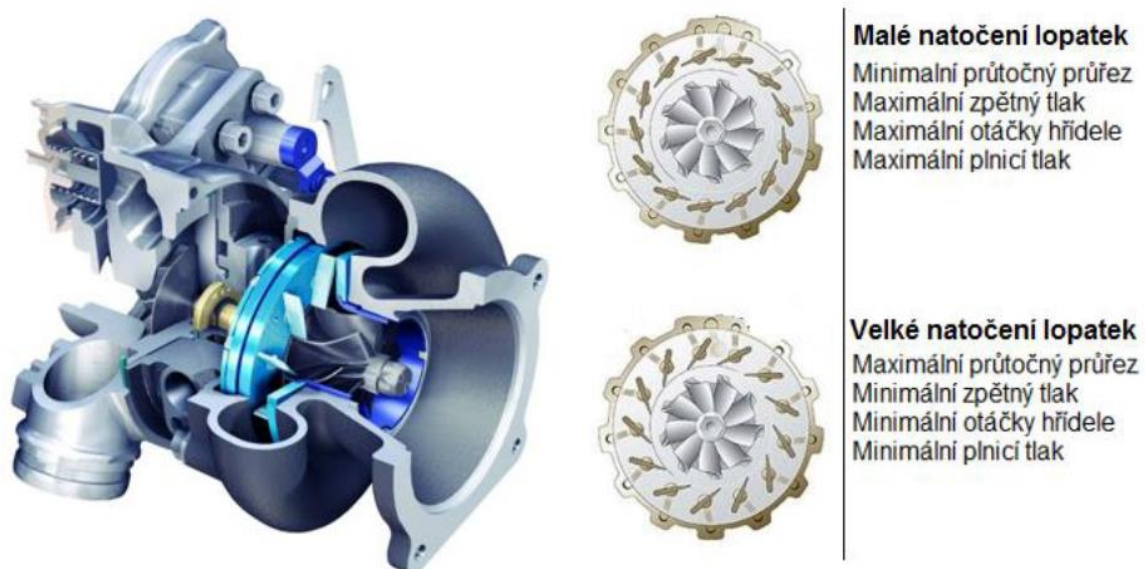


Obr. 2 Schéma regulace obtokovým ventilem (Waste Gate) [8]

2.2.2 REGULACE TLAKU POMOCÍ PROMĚNLIVÉ GEOMETRIE LOPATEK VGT/VNT

Proměnlivá geometrie lopatek, neboli VGT (Variable-geometry turbocharger), také známá jako VNT (Variable nozzle turbine), je příklad aktivní regulace turbodmychadla. Tlak je regulován v celém spektru provozních otáček motoru. Systém využívá rovnice kontinuity, z níž vyplývá, že čím menší je průtočný průřez, tím vyšší je rychlost proudění plynů. Přes turbínu tedy protéká stále plný hmotnostní průtok výfukových plynů. Ten je řízen řadou lopatek uložených ve statoru turbíny, které se pohybují přesně v závislosti na požadavku plnicího tlaku turbodmychadla. Při nízkých otáčkách motoru se lopatky natočí tak, aby se snížila průtočná plocha, tím dojde ke zvýšení rychlosti proudění výfukových plynů, zvýší se výkon turbíny a plnicí tlak turbodmychadla. Při vyšších otáčkách motoru se lopatky otevřou s cílem maximalizovat průtok výfukových plynů, tím sníží rychlost proudění, čímž zabrání překročení maximálních otáček rotoru turbodmychadla a udrží se požadovaný plnicí tlak. [9], [10]

Motory osazené turbodmychadly se systémem VGT/VNT vykazují vyšší kroutící momenty, zejména při nízkých otáčkách motoru a napomáhají čistšímu spalování, vyšší výkonnosti motoru v širokém spektru otáček a lepší akceleraci díky citlivější přechodové odezvě. Tato technologie je také klíčovým předpokladem pro zmenšování motorů (tzv. downsizing). Jedná se o moderní trend vytvářet menší, úspornější a účinnější pohonné jednotky, které svými parametry odpovídají větším a objemnějším motorům. [10]



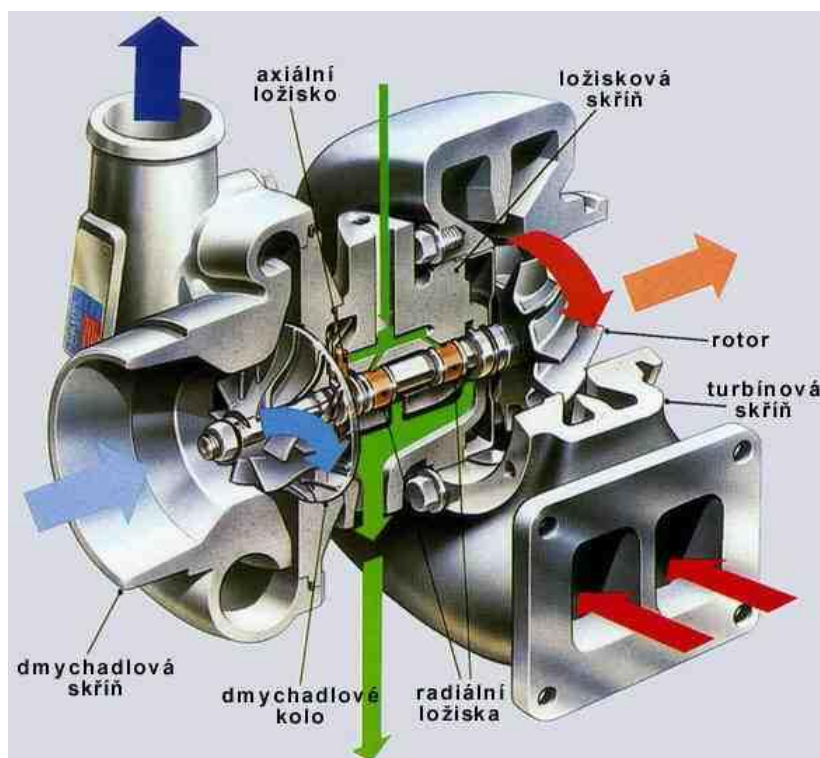
Obr. 3 Princip regulace pomocí VNT mechanismu [11]

3 KONSTRUKCE TURBODMYCHADLA

Turbodmychadlo se konstrukčně řadí mezi vysokootáčkové lopatkové stroje. Skládá ze tří základních částí vytvářejících samostatné konstrukční celky. Turbínová skříň s turbínovým kolem vytvářejí turbínovou část, kompresorové kolo s kompresorovou skříní tvoří kompresorovou část a ložiska s hřídelí ložiskovou část. Lopatkové turbínové kolo a lopatkové kolo kompresoru jsou uložena na jednom hřídeli, dohromady vytvoří rotor turbodmychadla. [12]

Podle druhu a režimu zatížení se otáčky pohybují přibližně mezi $30\,000\text{ min}^{-1}$ a $300\,000\text{ min}^{-1}$. Z důvodu takto vysokých otáček jsou kladeny značné nároky na přesnost výroby, kvalitu povrchu, mazání a vyvážení rotoru. Hřídel bývá nejčastěji uložena v plovoucích kluzných pouzdrech, ale také na jehličkových, nebo kuličkových valivých ložiskách. Plovoucí kluzná pouzdra se otáčejí ve stejném smyslu jako hřídel. Jelikož se tímto konstrukčním řešením snižuje relativní rychlost mezi rotorem a kluznými ložisky, jsou nižší také třecí ztráty a opotřebení hřídele. Mazání ložisek je zajištěno napojením na tlakový mazací okruh motoru. [13]

Turbínové kolo je nejčastěji vyrobeno z žáruvzdorné slitiny, vhodné pro vysoké teploty výfukových plynů vznětových i zážehových motorů. Kolo je vyrobeno přesným litím. Mezi turbínovou a ložiskovou skříní je vložena termo-izolační vložka, která omezuje přestup tepla z turbíny do zbytku turbodmychadla. Hřídel je vyrobena z ušlechtilé oceli a s turbínovým kolem je spojena třecím svařováním. Kompresorové kolo je rovněž vyrobeno přesným litím, namísto žáruvzdorné slitiny se používá slitin hliníku. Na hřídel je kolo kompresoru upevněno pomocí matice našroubované na závitový konec hřídele. [13]



Obr. 4 Řez turbodmychadlem [14]

3.1 TURBÍNOVÁ ČÁST

Turbína turbodmychadla je poháněna výfukovými plyny proudícími z motoru. Rozlišujeme dvě formy, jak přivádět výfukové plyny do turbíny. Jestliže výfukové plyny přivedeme před turbínu ve formě tlakových a teplotních impulzů, hovoříme o impulzní turbíně, nebo impulzním provozu turbíny. Jsou-li teplota a tlak před turbínou ustálené, jde o rovnotlakou turbínu, nebo rovnotlaký provoz turbíny. [15]

Turbína turbodmychadla má dvě části, statorovou a rotorovou, neboli skříň a oběžné kolo turbíny. Skříň je zpravidla vyrobena z litiny a dosedací plochy jsou obrobeny na požadované rozměry. Součástí skříně je také pasivní, nebo aktivní regulace, jež byla popsána v kapitole 2.2. U moderních turbodmychadel bývá turbínová skříň často integrální součástí svodů motoru, to přispívá k úspoře místa a materiálu. Nevýhodou tohoto řešení je tvarová složitost součásti, což se nepříznivě odráží na výrobní ceně.



Obr. 5 Turbínová skříň jako integrální součást svodů [16]

Oběžné kolo turbíny je uloženo v turbínové skříně s mírnou vůlí, aby při rotaci nedošlo vlivem teplotní roztažnosti ke kontaktu lopatek se skříní, což by vedlo k destrukci lopatek turbínového kola. Jak již bylo zmíněno kolo turbíny, je vyrobeno přesným litím ze žáruvzdorných ocelí a s hřídelí je spojeno třecím svařováním.



Obr. 6 Turbínové kolo s hřídelí

3.2 KOMPRESOROVÁ ČÁST

Podobně jako turbína je i kompresor složen ze statoru a rotoru, neboli kompresorové skříňe a oběžného kola kompresoru. Kompresorová skříň je také vyrobena litím, jako materiál jsou používány slitiny hliníku. Ve skříni je mnohdy integrován odfukový ventil (anglicky blow-off valve), který slouží pro přepuštění přebytečného tlaku do sacího potrubí před kompresor. Na skříni kompresoru je upevněn elektrický, nebo podtlakový aktuátor pro ovládání regulace turbodmychadla.



Obr. 7 Kompresor s integrovaným odfukovým ventilem [17]

Oběžné kolo kompresoru je vyrobeno přesným litím nejčastěji z hliníku. U malých vysokootáčkových turbodmychadel se pro výrobu těchto kol využívá titan, který má vyšší únavovou pevnost. Kolo je umístěno na čepu hřídele a připevněno maticí dotaženou ve směru otáčení.



Obr. 8 Oběžné kolo kompresoru [18]

3.3 LOŽISKOVÁ ČÁST

U moderních turbodmychadel se používá uložení rotoru mezi oběžnými koly. To umožňuje vytvoření velmi malých a kompaktních turbodmychadel. Nejčastěji je rotor uložen na kluzných ložiscích, ale výjimečně také na valivých ložiscích. Mazání je provedeno tlakovým olejem z motorového mazacího okruhu. Olej zde má z velké části i chladicí funkci. [15]

Ložisková skříň je vyrobena z litiny, nacházejí se v ní otvory pro ložiska, vstup a výstup mazacího oleje a chladicí kapaliny. Je to zřejmě nejdůležitější součást celého turbodmychadla. Veškeré komponenty a díly jsou osazovány právě na ložiskovou skříň. Nachází se v ní kompletní uložení rotoru, jsou na ni připevněny také turbínová a kompresorová skříň.



Obr 9 Ložisková skříň s rotorem

3.3.1 VALIVÁ KULIČKOVÁ LOŽISKA

Uložení rotoru pomocí valivých ložisek bylo vyvinuto pro letecký průmysl, později se aplikovalo v motorsportu, a nyní se přesouvá ke komerčnímu použití do osobních a užitkových vozidel. První generace tohoto uložení byla tvořena dvěma ložisky umístěnými na opačných stranách rotoru. Další generace byla již tvořena společnou maticí, která obsahuje kuličková ložiska s kosoúhlým stykem, díky tomu odpadá nutnost použití axiálních ložisek. V nejnovější generaci je užito hybridní matrice s keramickými třecími plochami kuličkových ložisek, to snižuje tření a zvyšuje odolnost proti opotřebení. [19], [20]

Užití valivých ložisek v turbodmychadlech zvyšuje účinnost a snižuje třecí ztráty. Zkracuje se čas potřebný k dosažení nejvyššího plnicího tlaku (anglicky time-to-boost) v rozmezí 20 – 70%. Příznivá je též o 2% nižší spotřeba při užití této technologie. Ložisko je mnohem méně závislé na mazání, tudíž i při studených startech funguje skvěle. [19]



Obr. 10 Matrice s kuličkovými ložisky [21]

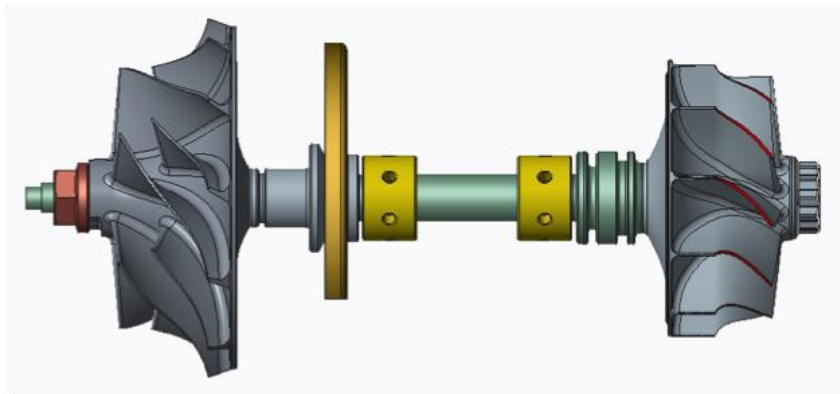
3.3.2 KLUZNÁ KAPALINOVÁ LOŽISKA S PLOVoucím POUZDREM

Kluzná kapalinová ložiska s plovoucím pouzdrům jsou v současnosti nevyužívanějším způsobem uložení rotoru turbodmychadla. Ložiska jsou principiálně velmi jednoduchá, nenáročná na výrobu a mají velice dobré dynamické vlastnosti. Používají se dva typy plovoucích pouzder, rotující a nerotující, neboli zastavená. [22]

Turbodmychadlové rotory mají radiální ložiska od sebe relativně málo vzdálena. Na obou koncích jsou umístěna hmotná oběžná kola, dynamika rotoru je tudíž do značné míry ovlivněna gyroskopickými momenty vznikajícími od těchto kol. Důsledkem je rozdělení kritických otáček do dvou větví precese. Vliv gyroskopických momentů je paradoxně velice příznivý na dynamiku rotoru, díky nimž je provozní oblast zcela zbavena rezonančních jevů. [22]

Uložení rotujícím pouzdrům

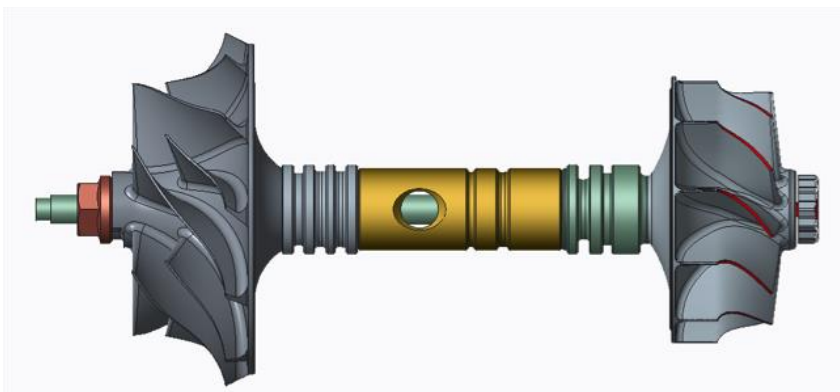
Turbodmychadla s rotujícími pouzdry jsou používána standardně v nákladních automobilech a pracovních strojích, nebo také lodních motorech. Tato technologie je využívána zejména pro své dobré tlumicí účinky, poskytující stabilizaci rotoru a nižší třecí ztráty. Jedná se o uložení tvořené dvěma radiálními kluznými ložisky se dvěma kluznými pouzdry a jedním axiálním kluzným ložiskem. Radiální pouzdra jsou převážně vyrobena z bronzu a mají nejčastěji čtyři až šest drážek umožňujících průtok mazacího oleje do ložiska. Vnitřní vůle, tedy vůle mezi vnitřním průměrem pouzdra a hřídelí, je menší než vůle vnější, tedy vůle mezi pouzdrům a ložiskovou skříní. Rychlost otáčení rotujícího pouzdra je cca 0,1 až 0,3 násobek rychlosti hřídele, snižuje se tedy relativní rychlost pohybu a díky tomu také třecí ztráty. [12], [22]



Obr. 11 Uložení rotoru rotujícím pouzdrem [23]

Uložení nerotujícím/zastaveným pouzdrem

Rozlišujeme dva typy nerotujících kluzných ložisek, a to se sdruženým radiálně-axiálním pouzdrem a radiální pouzdro se samostatným axiálním kluzným ložiskem. Turbodmychadla s nerotujícími ložisky se využívají zejména v automobilech se vznětovými motory. U tohoto typu ložiska se používá přídavné tlumení, které využívá tlumící olejové vrstvy mezi ložiskovou skříní a ložiskem z důvodu redukce destabilizačních sil. Nejčastěji se pro tento typ uložení využívá takzvaného „Z-ložiska“. Jde o nerotující ložisko, které je na straně zajištěno pinem (kolíkem) proti pohybu. [12]



Obr 12 Uložení rotoru nerotujícím radiálně-axiálním ložiskem [23]



Obr. 13 Zajištění radiálně-axiálního ložiska pinem

3.3.3 PLYNOVÁ LOŽISKA

Plynová ložiska (anglicky Air bearings) dělíme do dvou základních skupin, aerostatická a aerodynamická ložiska. Aerostatická ložiska vyžadují pro provoz zdroj tlakového vzduchu, aerodynamická ložiska si samy vytvářejí potřebný provozní tlak. [24]

Plynová ložiska, jsou ložiska využívající tenkou vrstvu tlakového vzduchu, který poskytuje nosné rozhraní s velice nízkým, téměř nulovým třením mezi plochami ložiska. Funkční plochy ložiska se navzájem nedotýkají, odpadají tedy problémy tradičních ložisek, jako jsou opotřebení, tření, potřeba mazání a podobně. Tato ložiska poskytují značné výhody jako přesné umístění, nemají takové vůle a statické tření a používají se při vysokorychlostních aplikacích. [25]

Médiem pro vytvoření kluzného filmu mezi třecími plochami ložiska je vzduch, který proudí skrze samotné ložisko. Z důvodu, že za provozní teploty je viskozita většiny plynů dvakrát až třikrát nižší než viskozita minerálních olejů, jsou také únosnost a třecí ztráty, při zachování stejných rozměrů jako u hydrodynamických ložisek, až trojnásobně menší. [26]

Ovšem u takovýchto ložisek, vzhledem k nízké viskozitě plynů, vzniká problém s tlumením, které není dostačující, a proto se prakticky nelze vyhnout kritickým ohybovým otáčkám. Rotor se tedy musí navrhovat jako tuhý a je potřeba jej navrhnout tak, aby první kritické ohybové otáčky byly vzdáleny alespoň 60% od maximálních provozních otáček. V některých případech nemusí postačit ani splnění této podmínky. Nastane-li takový stav, je potřeba provést korekci prvního ohybového tvaru rotoru, z důvodu dosažení vhodných amplitud relativních kmitů. [26]

Plynová ložiska se používají v řadě aplikací, některé z nich jsou zmíněny v kapitole 4.3. Použití plynových ložisek v turbodmychadlech sice v současné době prochází vývojem a testovací fází, ale i přesto je známo, že je v této aplikaci užito ložisek aerodynamických, proto se dále tato práce bude zabývat právě jimi.

4 AERODYNAMICKÁ LOŽISKA

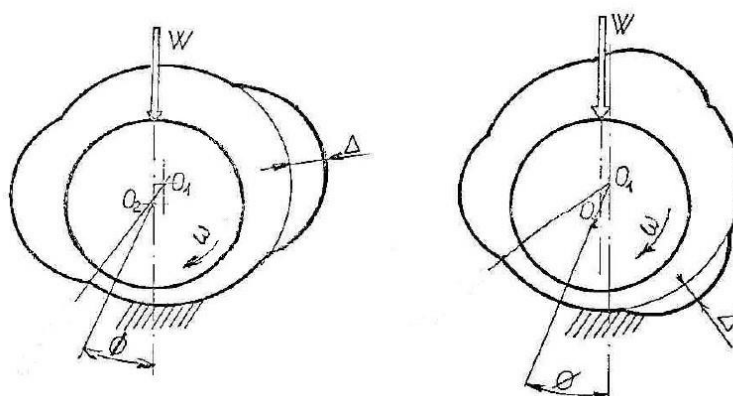
Aerodynamická ložiska lze rozdělit do dvou skupin (radiální a axiální), několika druhů a následně typů, které budou popsány v této kapitole. Dále zde budou popsány stávající aplikace těchto ložisek v praxi.

4.1 RADIÁLNÍ AERODYNAMICKÁ LOŽISKA

Aerodynamická ložiska pracují na stejném principu jako ložiska hydrodynamická, jediným rozdílem je viskozita pracovního média, tedy plynu, který má, jak již bylo zmíněno výše, několikanásobně nižší dynamickou viskozitu než kapaliny. Kvůli špatným stabilním vlastnostem těchto ložisek nelze použít relativně jednoduché geometrie, ať už kruhového nebo citrónového průřezu, jako tomu bylo u ložisek hydrodynamických, ale je nutno využít jiné, složitější geometrie. [26]

4.1.1 LOŽISKO S KAPSAMI

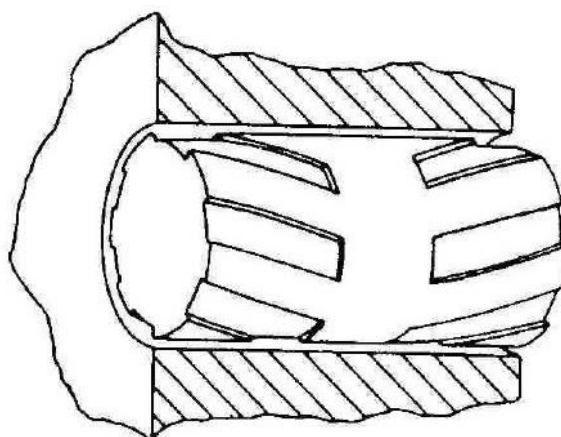
Ložiska s kapsami jsou ve své podstatě modifikací ložiska citrónového a tříplochého. Těmito modifikacemi vznikla ložiska se dvěma a třemi kapsami. Namísto kluzných ploch s poloměrem větším než je poloměr ložiska, mají kapsy poloměr křivosti menší. To vytváří tlakové špičky po obvodu, které vrací hřídel do středu, a tím dochází ke zlepšení stability. [26]



Obr. 14 Aerodynamické ložisko se dvěma a třemi kapsami [26]

4.1.2 LOŽISKO SE SPIRÁLNÍMI DRÁŽKAMI

Tento typ ložiska má dvě řady drážek, čerpající plyn do ložiska, tím dochází ke zlepšení stability a zvýšení únosnosti. Ložisko se spirálními drážkami, i výše zmíněná ložiska s kapsami mají ovšem vysoké nároky na přesnost výroby, kvůli malé ložiskové vůli, která je pro jejich provoz nezbytná. To může způsobovat problémy s teplotní dilatací a vzniká riziko zadření. [26]



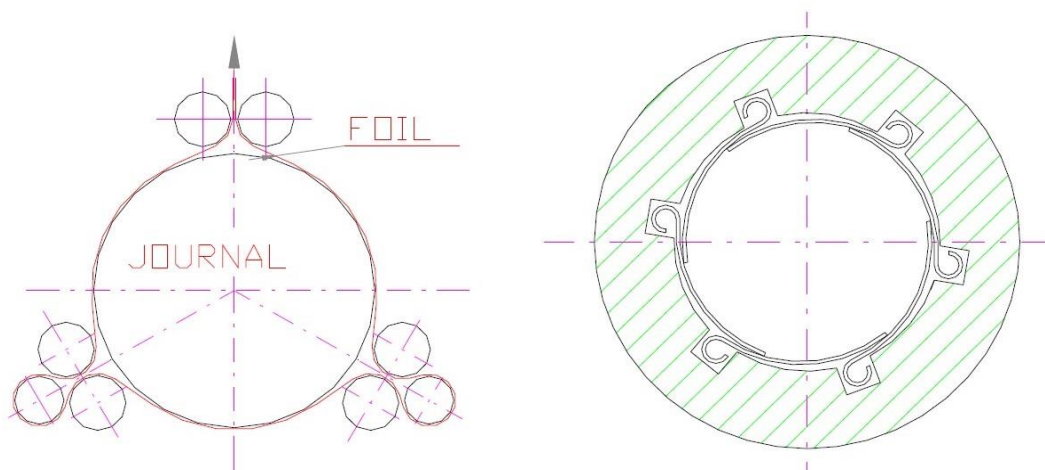
Obr. 15 Aerodynamické radiální ložisko se spirálními drážkami [26]

4.1.3 FÓLIOVÁ LOŽISKA

Rozlišujeme 3 druhy těchto ložisek, ložisko s taženou fólií, s ohýbanou fólií a Hydresil ložisko. Funkční plocha těchto ložisek je vytvořena z jednoho nebo více poddajných elementů, jejichž geometrie se mění v závislosti na působení tlaku v plynovém filmu. [26]

Ložiska s taženou / ohýbanou fólií

Ložiska s taženou fólií, nebo s ohýbanými fóliemi nemají zcela optimální tvar pracovní mezery, fólie se přitlačuje k povrchu hřídelového čepu, zvyšuje se tření a rozběh rotoru je velice obtížný. [26]

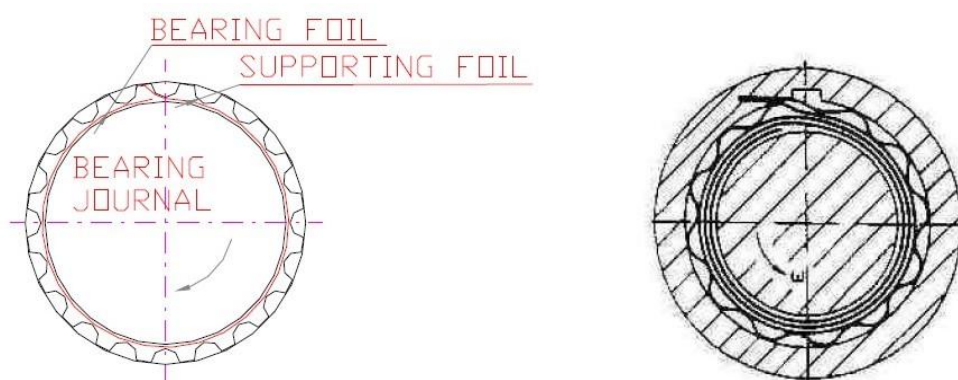


Obr. 16 Fóliové ložisko s taženou fólií / s ohýbanými fóliemi [26]

Ložisko Hydresil

Fóliová ložiska prošla dlouhým vývojem a jako nejvhodnější se jeví ložisko Hydresil, které je složeno ze dvou fólií. Silnější zvlněná fólie vytváří podporu tenčí ložiskové fólii a ta tvoří kluznou plochu ložiska. Tyto fólie se vlivem tlaku v plynovém filmu deformují a tím vytvářejí vhodnou geometrii ložiskové mezery. V případě zmenšení vůle je zvlněná fólie svou pružností schopna korekce polohy hřídelového čepu. Zbytková nevyváženost rotoru může způsobit jeho chvění, to je doprovázeno třením mezi fóliemi, díky kterému vzniká dodatečné tlumení. Hydresil má také druhou variantu, využívající několikanásobné vinutí tenké fólie okolo

hřídelového čepu rotoru, což vytváří další tlumení. Bohužel tato tenká fólie je zároveň největší slabinou celého ložiska. [26]



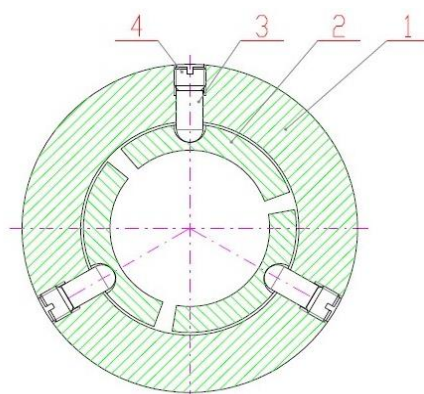
Obr. 17 Ložisko Hydresil / Hydresil s několika násobným vinutím [26]

4.1.4 LOŽISKA S NAKLÁPĚCÍMI SEGMENTY (LNS)

Ložiska s naklápěcími segmenty mají malé vedlejší prvky matice tuhosti, což jim propůjčuje skvělé dynamické vlastnosti. Těmito vedlejšími prvky jsou vytvářeny tangenciální síly, ty podporují nestabilitu rotoru a nutí hřídelový čep rotovat okolo středu ložiska. Ložiska LNS mají vedlejší prvky až o 3 řády menší než hlavní prvky, což má za následek lepší stabilitu, a nestabilita může být způsobena pouze destabilizačními silami vzniklými od jiných částí ložiska. Všechny tyto skutečnosti platí pro hydrodynamická i aerodynamická ložiska s tím rozdílem, že počet segmentů u hydrodynamických ložisek je nejčastěji 4 až 5 a u aerodynamických jsou zpravidla segmenty 3. To je způsobeno nízkou viskozitou plynů, protože pro vytvoření dostatečného tlaku ve filmu je zapotřebí větší kluzná plocha, dalším důvodem je také ložisková vůle, kladoucí vysoké nároky na přesnost výroby. [26]

Jednoduché LNS

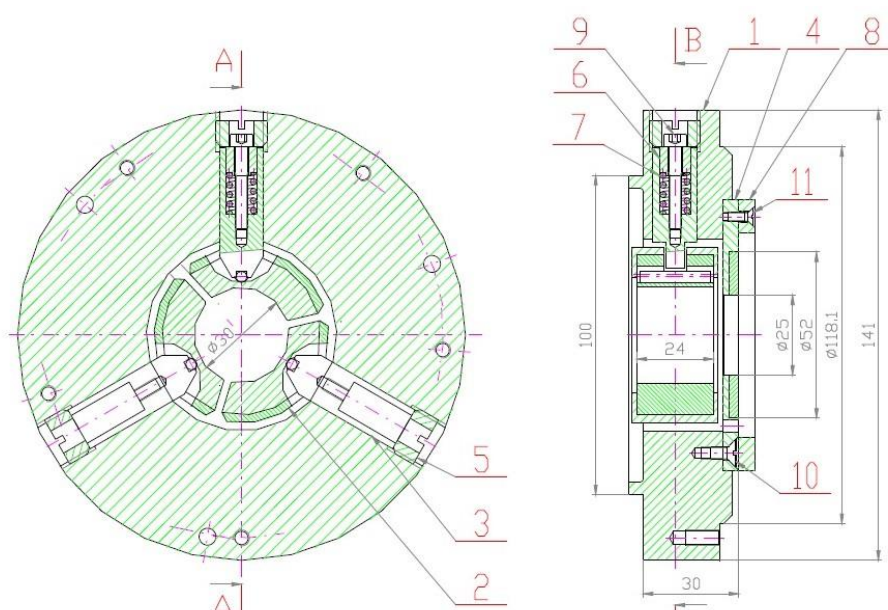
V ložiskovém tělese **1** jsou uloženy segmenty **2** na polokulovém konci čepů **3**. Jejich poloha se nastavuje dorazy **4**. Společně s ložiskovou vůlí lze nastavit i polohu segmentů, čímž lze změnit polohu středu ložiska. Nastavení ložiskové vůle probíhá ručně při montáži samotného ložiska. Vlivem nevyváženosti rotoru je způsoben pohyb segmentů, tím dochází ke kontaktu ploch mezi sebou a k následnému opotřebení, což zkracuje životnost ložiska. Nevýhodou je neschopnost adaptace ložiska na změnu podmínek, nejčastěji způsobené tepelným vlivem. [26]



Obr. 18 Jednoduché LNS ložisko [26]

LNS s autokompenzací ložiskové vůle

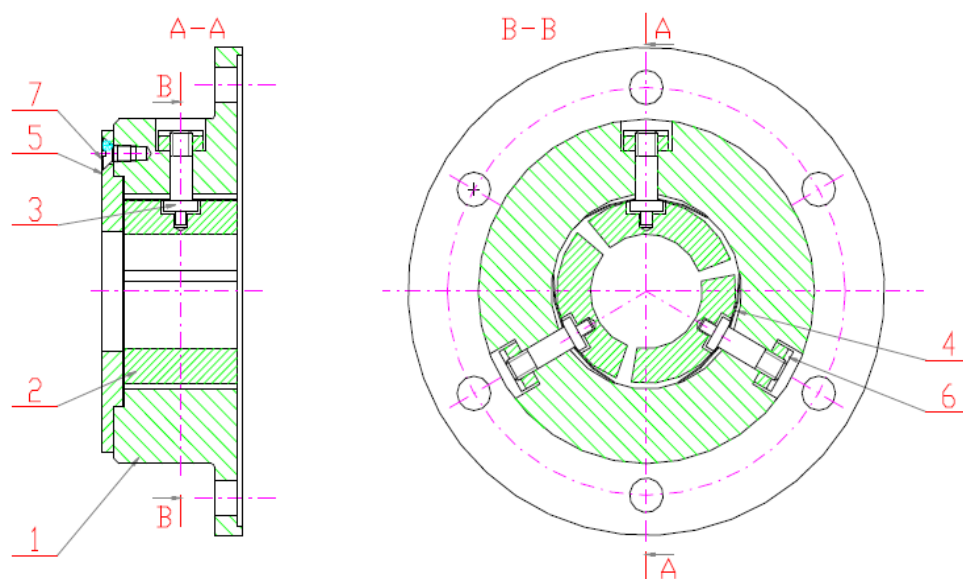
Potlačení nevýhody jednoduchého LNS docílíme použitím LNS ložiska se systémem autokompenzace. Tento typ využívá naklápění segmentů v obvodovém i příčném směru bez většího opotřebení. V ložiskovém tělese **1** je uložena podpěra segmentu **3**, která podepírá segment **2** v jeho výřezu. Při pohybu v obvodovém směru se segment po čepu odvaluje, tím se snižuje tření a následné opotřebení. Dva ze tří segmentů mají pevně nastavenou polohu pomocí dorazů **5** a třetí segment je vybaven systémem autokompenzace, který v případě zmenšující se vůle, umožňuje pohyb segmentu v radiálním směru. Předpětí pružiny **7** určuje sílu, při níž dojde k posuvu segmentu. Předpětí pružiny a ložisková vůle jsou nastaveny polohou dorazu **6** a šroubu **9**, jimiž lze také nastavit maximální možný posuv segmentu. Ložisko má skvělé provozní vlastnosti, vysokou spolehlivost a dlouhou trvanlivost. Jeho konstrukce je ovšem velice složitá a drahá na výrobu. [26]



Obr. 19 LNS se systémem autokompenzace [26]

LNS se segmenty podepřenými pružnými elementy

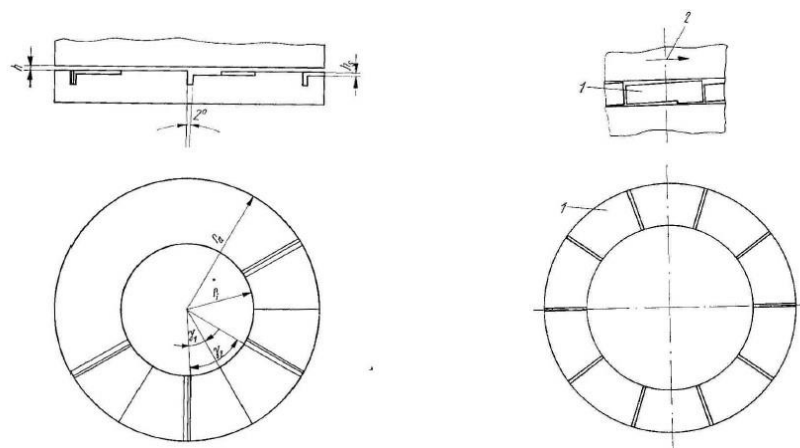
Z důvodu složité a drahé konstrukce předchozího typu ložiska, bylo vyvinuto ložisko LNS se segmenty podepřenými pružnými elementy. Toto ložisko, které má za úkol dosáhnout volného naklápění segmentů při zachování jednoduché konstrukce, spojuje dohromady přednosti fóliových a LNS ložisek. Uvnitř ložiskového tělesa **1** se nacházejí segmenty **2** umístěné na elastických elementech **4**, jež jsou pomocí šroubů **3** s maticemi **6** deformovány na požadovaný tvar. Pomocí matic **6** lze nastavit ložiskovou vůli. Vnější poloměr segmentu a vnitřní průměr ložiskového tělesa jsou rozdílné, to umožňuje volné odvalování segmentů po povrchu pružného elementu. Ložisková mezera je na rozdíl od ložisek fóliových dána rozdílem mezi poloměry hřídelového čepu a segmentu a její tvar lze optimalizovat. Velmi podobně jako u fóliových ložisek, pak tření mezi pružnými podpěrami a ložiskovým tělesem přispívá k lepšímu tlumení plynového filmu. Celkové tlumení je také zvýšeno vytlačováním plynu z ložiskové vůle (tzv. squeeze effect). [26]



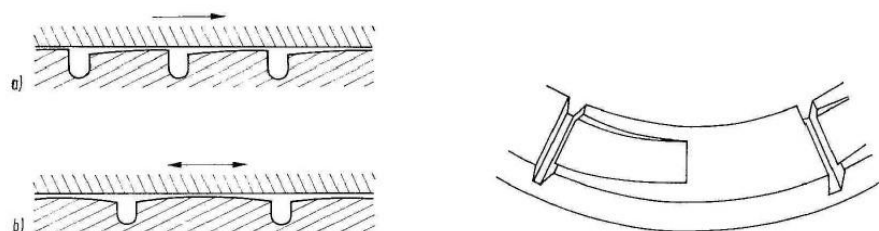
Obr. 20 LNS se segmenty podepřenými pružnými elementy [26]

4.2 AXIÁLNÍ AERODYNAMICKÁ LOŽISKA

Rozlišujeme velké množství typů axiálních aerodynamických ložisek. V této podkapitole jsou uvedeny některé příklady těchto ložisek (Obr. 21 a 22), většinu z nich ovšem nelze použít pro náročnější aplikace, z důvodu nízké únosnosti, či neschopnosti přizpůsobit se provozním podmínkám. Proto se dále budeme podrobně zabývat pouze dvěma typy těchto ložisek, a to fóliovými ložisky a ložisky se spirálními drážkami, která vykazují jak vhodnou adaptaci na provozní podmínky, tak vysokou únosnost. [26]



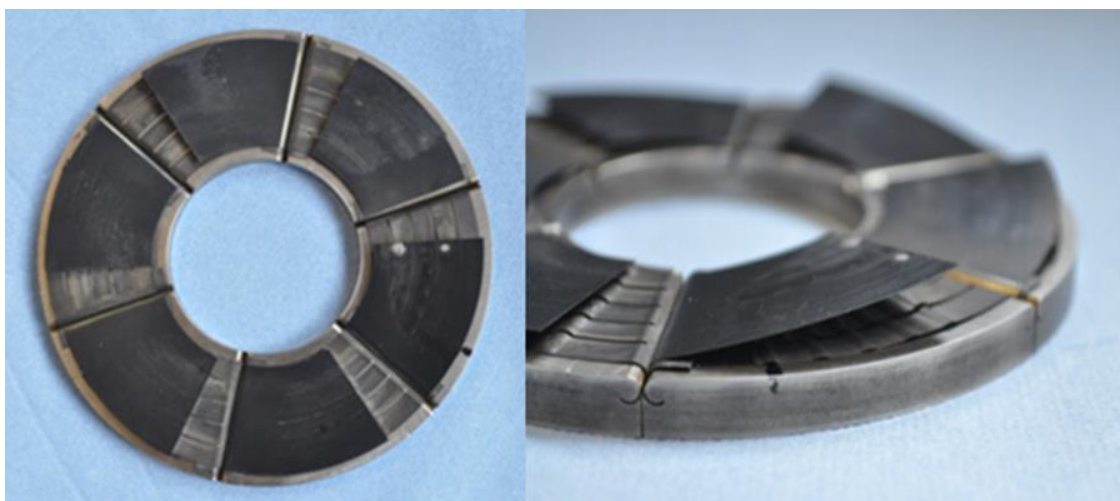
Obr. 21 Stupňovité axiální ložisko / Ložisko s naklápěcími segmenty [26]



Obr. 22 Ložisko s klínovými plochami / Ložisko s kapsami [26]

4.2.1 AXIÁLNÍ FÓLIOVÁ LOŽISKA

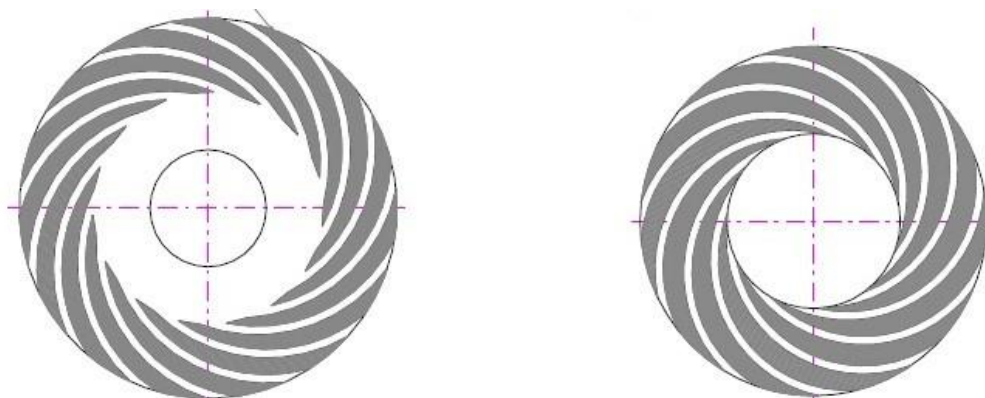
Axiální fóliové ložisko (FL) bylo původně složeno z tenkých fólií připevněných k pružné membráně s žebry, která podírala ony tenké fólie. Ložisko vykazovalo relativně dobré vlastnosti a schopnosti adaptace, ale později bylo dále vylepšeno. Tím nechal vzniknout fóliovému axiálnímu vinutému ložisku, které je opatřeno dvěma druhy fólií, ve své podstatě se jedná o odnož ložiska Hydresil. Na silnější podpěrné zvlněné fólii je připevněna tenčí fólie, vytvářející kluznou plochu. To umožňuje adaptabilitu ložiskové mezery v závislosti na velikosti generovaného tlaku a provozních podmínek. Fólie jsou pružné, což umožňuje výborné tlumení vibrací od stroje či motoru. I přes relativně nízkou únosnost, vlivem rozdělení kluzné plochy na několik menších segmentů, je ložisko vhodné pro obtížné provozní podmínky. [26]



Obr. 23 Fóliové axiální vinuté ložisko [27]

4.2.2 AXIÁLNÍ LOŽISKA SE SPIRÁLNÍMI DRÁŽKAMI

Tato ložiska vynikají svou extrémní únosností, zejména tedy ložisko s uzavřeným středem, neboli bez průchozího otvoru. Plyn je spirálními drážkami čerpán dovnitř (směrem ke hřídelovému čepu), a tudíž nemůže z ložiska uniknout. Stejných výsledků dosahuje také polokulové ložisko se spirálními drážkami bez průchozího otvoru. Ovšem oba typy těchto ložisek se používají jen zřídka, kvůli axiálním silám směřujícím ke kompresorovému, nebo turbínovému kolu. Proto je vhodné užití ložiska s průchozím otvorem čerpající dovnitř, které má nižší, nýbrž dostatečnou únosnost, a plyn může z ložiska pozvolna unikat. [26]



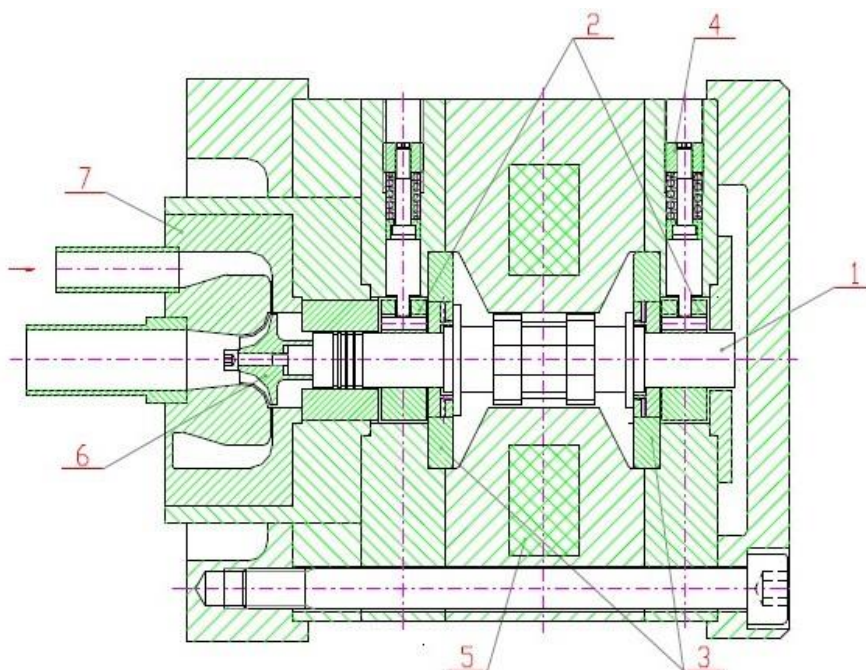
Obr. 24 Axiální ložisko se spirálními drážkami s průchozím otvorem / s uzavřeným středem [26]

4.3 APLIKACE AERODYNAMICKÝCH LOŽISEK

V této kapitole jsou popsány některé dosavadní aplikace aerodynamických ložisek v praxi. Tato ložiska mají široké uplatnění v různých oblastech. Pro radiální uložení se nejčastěji používá typ LNS, mající výborné dynamické vlastnosti zajišťující stabilitu při extrémně vysokých otáčkách. LNS ložiska, která kombinují výhody ložisek s naklápěcími segmenty a ložisek fóliových. Pro axiální uložení jsou zpravidla použita ložiska se spirálními drážkami, nebo fóliová vinutá ložiska. Všechny tyto typy byly úspěšně a dlouhodobě testovány v různých provozních podmínkách. [28]

4.3.1 EXPANZNÍ TURBÍNA PRO ZKAPALŇOVÁNÍ HÉLIA

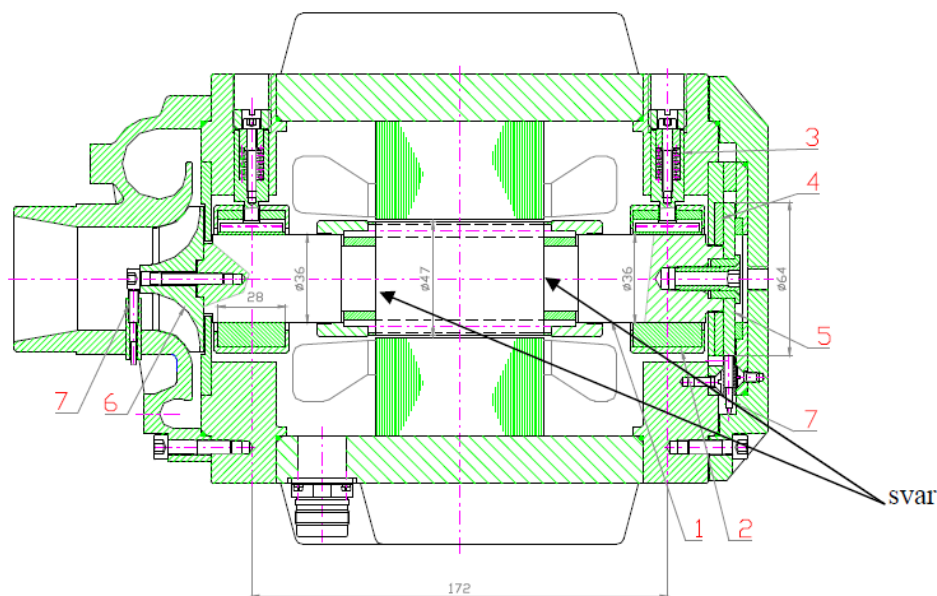
Jedná se o jednu z prvních úspěšných aplikací aerodynamických ložisek, která je popsána na obrázku 25. Rotor turbíny **1** je poháněn oběžným kolem **6** a je uložen na dvou radiálních ložiskách LNS **2**. Axiální polohu zajišťují ložiska se spirálními drážkami **3**. Otáčky jsou korigovány elektricky poháněnou brzdou **5**, která pracuje na principu vířivých proudů. Z důvodu velmi vysokých provozních otáček (zpočátku okolo $240\,000\text{ min}^{-1}$, dnes až $350\,000\text{ min}^{-1}$) a extrémně nízkých teplot (až -268 °C) na oběžném kole, je turbína provozována za velice náročných podmínek. O tom také vypovídá vnější obvodová rychlost axiálních ložisek nabývající hodnot $450\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Nicméně i přes náročné podmínky bylo vyrobeno a dlouhodobým, bezporuchovým provozem otestováno přes 300 různých modifikací expanzních turbín. [29]



Obr. 25 Expanzní turbína pro zkapaňování hélia [29]

4.3.2 RYCHLOBĚŽNÁ DMYCHADLA

Další velice úspěšnou aplikací aerodynamických ložisek je uložení rotoru rychloběžných dmychadel, jde o podobné uložení jako u expanzní turbíny. Uložení se používá pro různé velikosti a výkony pro otáčky dosahující řádově $110\,000\text{ min}^{-1}$. Dmychadlo s tímto uložením, poháněno vysokofrekvenčním motorem, je popsáno na obrázku 26. [29]



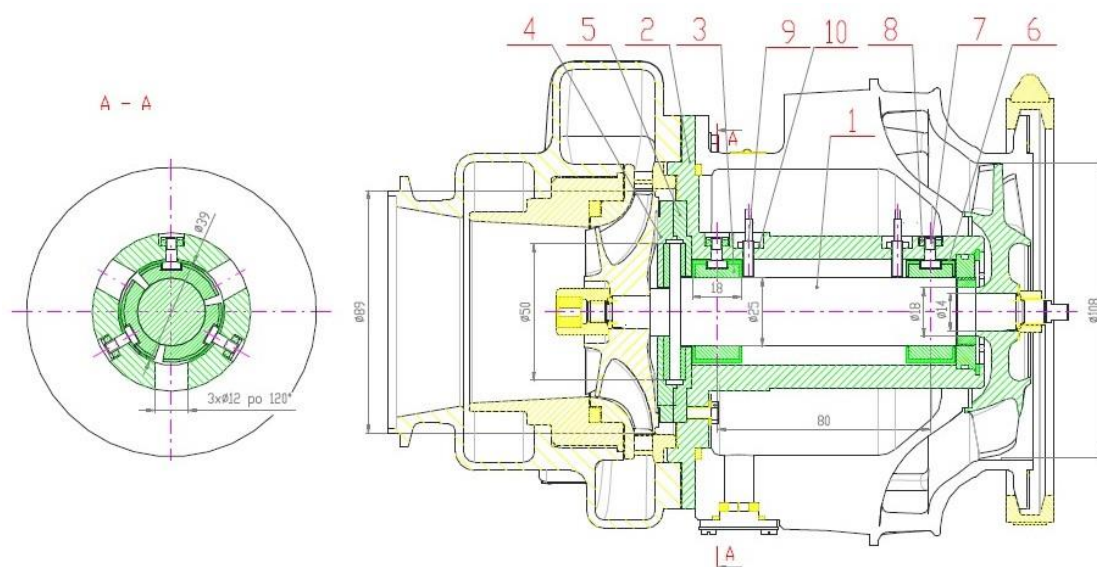
Obr. 26 Rychloběžné dmychadlo o výkonu 9 kW s max. ot. 80 000 min⁻¹ [29]

Radiální ložiska **2** s naklápěcími segmenty **3**, jsou schopna měnit ložiskovou vůli a posouvat s osou rotace. Dojde-li v důsledku teplotních dilatací ke zmenšení ložiskové vůle na kritickou hodnotu, segment se systémem pružného podepření (systém autokompensace) umožní radiální posuv, a tím zabrání nadměrnému opotřebení, nebo případnému zadření ložiska. Rotor je ve směru k oběžnému kolu axiálně zajištěn ložiskem se spirálními drážkami **4** a v opačném směru jsou náhodné síly zachyceny pomocným ložiskem **5**, sloužícím také jako ucpávka, která umožňuje regulovat zatížení hlavního axiálního ložiska. Pro tento stroj byla použita radiální ložiska o průměru 36 mm a axiální ložisko o průměru 64 mm. [29]

4.3.3 LETADLOVÉ KLIMATIZAČNÍ JEDNOTKY

Letadlové klimatizační jednotky původně využívaly uložení valivými ložisky vyžadujícími mazání olejem, což znečišťovalo vzduch přiváděný do kabiny letadla. Tento problém byl odstraněn použitím aerodynamických ložisek, které navíc umožnily zmenšení rozměrů jednotky, při zachování stejného výkonu, díky navýšení maximálních provozních otáček. Jako příklad je zde uveden turbochladič pro klimatizaci kabiny vrtulníku. [29]

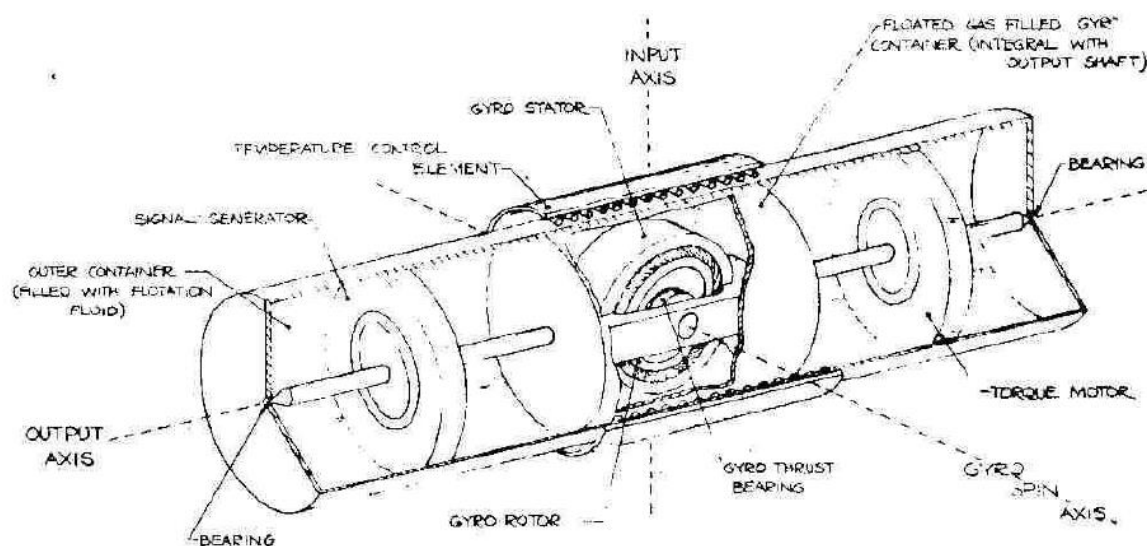
Rotor turbochladiče **1** je uložen pomocí dvou radiálních aerodynamických LNS ložisek. Segmenty **3** jsou podepřeny podložkami **6** z pružného materiálu, ty jsou deformovány čepy **7** a maticemi **8**. Poloměr zakřivení podložek je větší, než poloměr zakřivení segmentů, což umožňuje volné naklápění segmentů v obvodovém směru. Zároveň čepy **7** a maticemi **8** lze nastavit základní ložiskovou vůli. Adaptabilita na změnu provozních podmínek (tzn. Teplotní dilatace apod.) je zajištěna pružnými podložkami. Tyto podložky také omezují přenos vibrací způsobené vnějším buzením. Rotor je v axiálním směru zajištěn oboustranným ložiskem se spirálními drážkami **4**, **5**. Pomocí tohoto uložení je zajištěn bezpečný provoz až do otáček 65 000 min⁻¹. [29]



Obr. 27 Turbochladič klimatizační jednotky [29]

4.3.4 GYROSKOPY

Aerodynamická ložiska se díky svým výborným vlastnostem uplatnila také v gyroskopech. Obvykle gyroskop bývá uložen na dvou axiálních ložiscích po stranách a jednom radiálním ložisku, jedná se o „H“ uspořádání. Kvůli zajištění stability muselo mít radiální ložisko nekruhový tvar, nebo bylo nutné vytvořit na čepu spirální drážky, axiální ložiska byla užita se spirálními drážkami, a to na stacionárním, či rotujícím členu. Pro zajištění v radiálním a zároveň axiálním směru se ojediněle používala také sférická ložiska, což značně zjednodušilo konstrukci, ovšem razantně narostly nároky na přesnost a technologii výroby. [29]

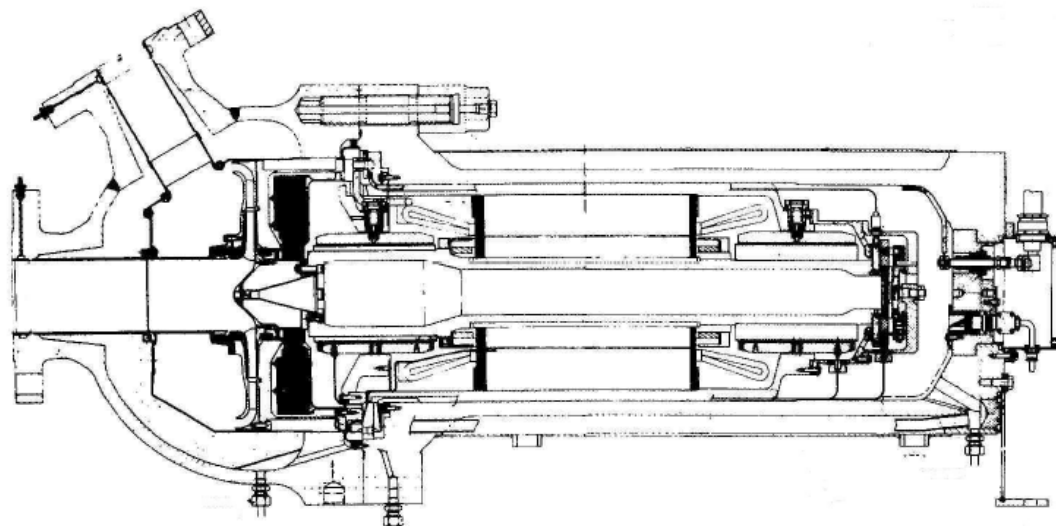


Obr. 28 Gyroskop uložen na aerodynamických ložiscích [29]

4.3.5 CÍRKULAČNÍ DMYCHADLA JADERNÝCH REAKTORŮ

Cirkulační dmychadla měla za úkol oběh chladicího plynu jaderných reaktorů, jejich otáčky se pohybovaly mezi 10 000 až 25 000 min⁻¹. Nejčastěji bylo pro uložení rotoru užito ložisek radiálních LNS a axiálních se spirálními drážkami, nebo také s naklápěcími segmenty. Jako médium bylo použito hélium, nebo CO₂. Stojí i přes obtížné provozní podmínky vykazovaly

vysokou spolehlivost, což potvrzuje více než 25 000 hodin bezproblémového provozu. I když se v dnešní době používá výhradně chlazení vodou, tak probíhá vývoj vysokoteplotních reaktorů, které budou opět chlazeny plynem, a bude tedy potřeba vyvinout nové cirkulační dmychadla. Vzhledem k vysokým teplotám (až 1000 °C) bude jediným možným řešením uložení rotoru dmyhadla na aerodynamických ložiscích. [29]



Obr. 29 Cirkulační dmyhadlo pro CO₂ [29]

4.3.6 DALŠÍ APLIKACE AERODYNAMICKÝCH LOŽISEK

Turbodmychadla

Vývoj a testování turbodmychadel s uložení rotoru na aerodynamických ložiscích byly uskutečněny již v nedávné minulosti. Výsledky ovšem nebyly uspokojivé a problémy spojené s užitím aerodynamických ložisek se nepodařilo plně odstranit. V současnosti probíhá další vývoj a pokusy pro malé automobilové, ale i velké kamionové turbodmychadla. V případě úspěšného uvedení takovýchto turbodmychadel do provozu odpadne nutnost mazání, tudíž by se otevřely nové možnosti umístění TD, což by také mohlo zvýšit účinnost přeplňování. [29]

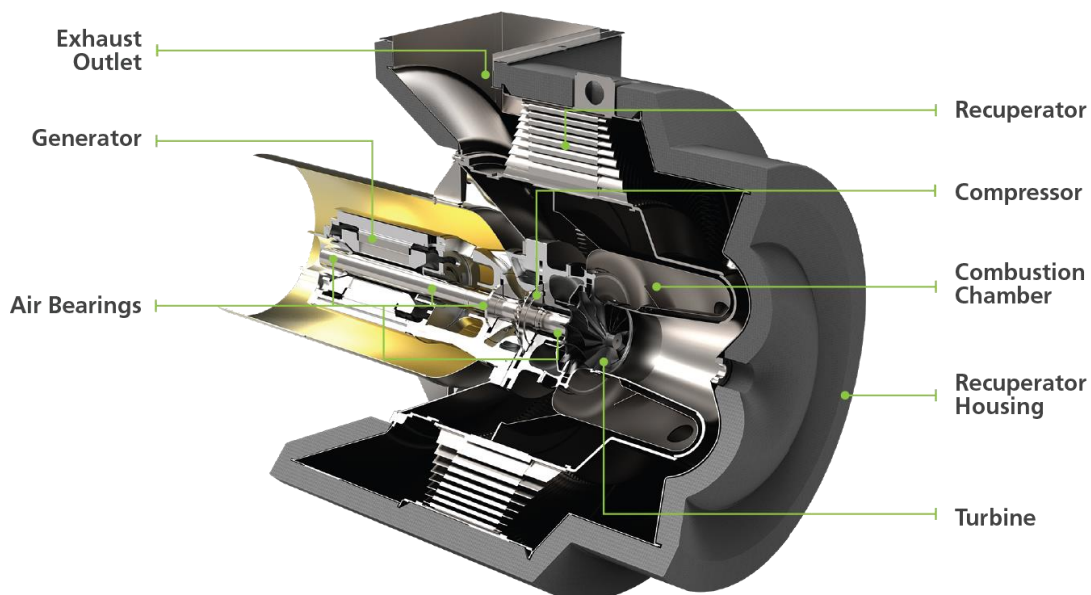
Uchování energie

V tomto případě je pojednáváno zejména o uchování přebytků energie, spojené s energetickými špičkami od obnovitelných zdrojů (např.: solární, nebo větrná energie). Jako vhodná možnost se mimo jiné jeví užití gyroskopů s vysokými otáčkami, uložených na aerodynamických ložiscích. Protože největší ztráty jsou způsobeny třením na povrchu disku, bylo by nutno použít jako médium plyn s nízkou hustotou (např.: hélium mající srovnatelnou viskozitu se vzduchem). Lze také využít magnetická ložiska, ovšem z hlediska vysoké ceny takovýchto ložisek se jeví aerodynamické uložení jako vhodnější. [29]

Malé energetické jednotky

Jedná se v podstatě o turbodmychadlový rotor a generátor s magnety. Generátor a rotor jsou uloženy na 4 fóliových aerodynamických ložiscích a dohromady jsou spojeny spojkou. Vývojem takových jednotek se zabývá například společnost Capstone. Tyto jednotky mají mnoho stejných základních komponentů a pracují na stejném cyklu jako velké turbíny. Atmosférický vzduch je stlačen a zahříván obvykle za pomoci přivedení a zapálení paliva. Poté

vzniklé plyny pohánějí turbínu, která pohání jak kompresor, tak hřídel generátoru vyrábějící elektrickou energii. Za účelem vyšší účinnosti jsou spálené plyny využívány k ohřívání plynů vstupujících do turbíny a rotor takovýchto jednotek dosahuje otáček až 60.000 min^{-1} . [29], [30]



Obr. 30 Energetická jednotka Capstone C65 [31]

5 VÝPOČETNÍ METODY

Vzhledem k enormnímu rozsahu dané problematiky budou v této kapitole pouze nastíněny některé výpočty aerodynamických ložisek. Konkrétně LNS a axiálních ložisek s kapsami. Výpočtové vztahy ostatních typů ložisek jsou velice obdobné, nebo z těchto vztahů vycházejí.

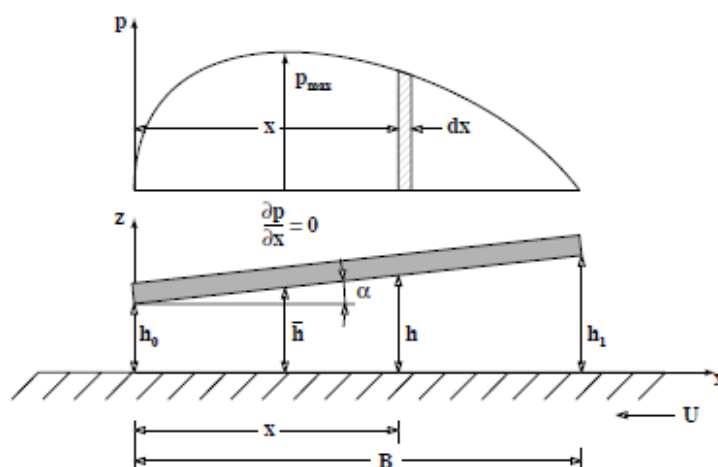
5.1 LOŽISKO S NAKLÁPĚCÍMI SEGMENTY (LNS)

Geometrie ložiska

Jako první krok je potřeba definovat geometrii. Geometrie kluzného filmu (Obr. 31) je vyjádřena rovnicí (1) jako funkce „ $h = f(x)$ “. Poměr „ K “ známý jako konvergence (sbíhavost), je dán vztahem $(h_1 - h_0)/h_0$. [32]

$$h = h_0 \left(1 + \frac{Kx}{B} \right) \quad [m] \quad (1)$$

h	$[m]$	vzdálenost segmentu od statoru v bodě x
h_0	$[m]$	nejmenší vzdálenost segmentu od statoru
K	$[-]$	poměr konvergence - sbíhavost
x	$[m]$	vzdálenost od počátku segmentu
B	$[m]$	šířka segmentu



Obr. 31 Geometrie axiálního LNS [32]

Tlak generovaný ložiskem lze vypočítat integrací Reynoldsovy rovnice přes specifickou geometrii kluzného filmu „ h “. Vzhledem k tomu, že je tlakový gradient ve směru „ x “ dominantní, může být pro analýzu tohoto ložiska použita jednorozměrná Reynoldsova rovnice (2) pro aproximaci dlouhých ložisek. [32]

$$\frac{dp}{dx} = 6U\eta \frac{h - \bar{h}}{h^3} \quad [Pa \cdot m^{-1}] \quad (2)$$

p	$[Pa]$	tlak
U	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	kluzná rychlost
η	$[N \cdot s \cdot m^{-2}]$	dynamická viskozita
h	$[m]$	vzdálenost segmentu od statoru v bodě x
\bar{h}	$[m]$	střední vzdálenost segmentu od statoru

Máme zde dvě proměnné „ x “ a „ h “ a rovnici lze integrovat podle „ x “ nebo „ h “. Vzhledem k tomu, že nezáleží na tom, podle které proměnné integraci provádíme, zvolíme jednu z nich a rovnici integrujeme. Následným vyjádřením a dosazením dostaneme finální podobu rovnice pro výpočet tlaku „ p “ generovaného ložiskem. [32]

$$p = \frac{6U\eta B}{Kh_0} \left(-\frac{1}{h} + \frac{h_0(K+1)}{h^2(K+2)} + \frac{1}{h_0(K+2)} \right) \quad [Pa] \quad (3)$$

Z rovnice je zřejmé, že generovaný tlak je úměrný kluzné rychlosti „ U “, šířce ložiska „ B “, dynamické viskozitě „ η “ a nepřímo úměrný konvergenčnímu poměru „ K “. Tedy, chceme-li zvýšit únosnost ložiska, je potřeba navýšit parametry „ U “, „ B “ a „ η “, případně snížit parametr „ K “. [32]

Únosnost

Celkové zatížení „ W “, které ložisko ponese u specifické geometrie kluzného filmu, je dosaženo integrováním tlaku „ p “ přes specifickou oblast ložiska. [32]

$$W = \int_0^L \int_0^B p dx dy \quad [N] \quad (4)$$

L $[m]$ délka segmentu

Následným upravením a dosazením odvodíme konečný vzorec pro výpočet únosnosti (5), kde „ L “ je délka jednoho segmentu ložiska.

$$\frac{W}{L} = \frac{6U\eta B^2}{K^2 h_0^2} \left(-\ln(K+1) + \frac{2K}{K+2} \right) \quad [N \cdot m^{-1}] \quad (5)$$

Pomocí poměru „ K “ lze optimalizovat geometrii ložiska pro jeho maximální únosnost. V takovém případě je poměr $K=1,2$. [32]

Třecí síla

Velikost třecí síly, generované ložiskem vlivem smykového napětí maziva, získáme integrací smykového napětí „ τ “ přes ložiskovou oblast. [32]

$$F = \int_0^L \int_0^B \tau dx dy \quad [N] \quad (6)$$

τ [Pa] Smykové napětí

Finální podobu vztahu pro výpočet třecí síly (7) dostaneme opět upravením a odvozením.

$$\frac{F}{L} = \frac{U\eta B}{h_0} \left(\frac{6}{K+2} - \frac{4 \ln(K+1)}{K} \right) \quad [N \cdot m^{-1}] \quad (7)$$

Podobně jako únosnost a tlak je třecí síla vyjádřena geometrickými a provozními parametry ložiska. Geometrie ložiska může být nyní optimalizována tak, aby poskytla minimální třecí sílu, ovšem výhodnější je optimalizovat ložisko pro nalezení minimálního koeficientu tření, protože to zajišťuje nejefektivnější geometrii ložiska pro jakékoliv zatížení. [32]

Koeficient tření

Definice koeficientu tření je vyjádřena jako poměr třecích sil a únosnosti působících na povrch. [32]

$$\mu = \frac{F/L}{W/L} \quad [-] \quad (8)$$

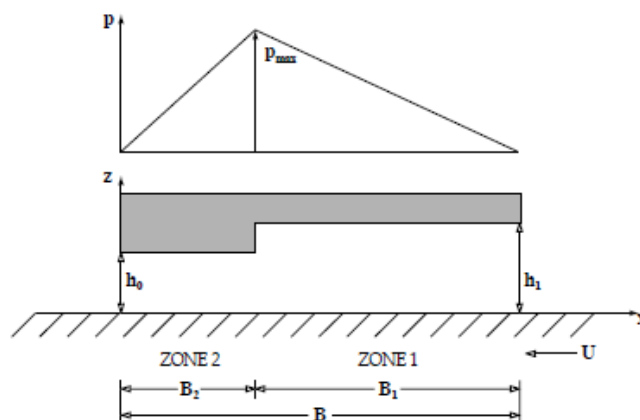
Dosažením „F/L“ a „W/L“ dostaneme vztah (9). Pomocí tohoto vztahu lze nyní vypočítat optimální geometrii, která poskytuje minimální tření. Pro minimální koeficient tření je poměr konvergence **K=1,55**. [32]

$$\mu = \frac{Kh_0}{B} \left[\frac{3K - 2(K+2) \ln(K+1)}{6K - 3(K+2) \ln(K+1)} \right] \quad [-] \quad (9)$$

Jak bylo uvedeno výše, maximální únosnost nastává při **K=1,2**, ale minimální koeficient tření je dosažen, když **K=1,55**. Při konstrukci ložiska musí být následně dosaženo kompromisu a mezi těmito dvěma hodnotami „K“, tj. **1,2 < K < 1,55**, aby se dosáhlo optimálního výkonu. [32]

5.2 AXIÁLNÍ LOŽISKO S KAPSAMI

Tento typ ložiska má dva povrchy rotoru rovnoběžné s povrchem statoru, které rozdělují kluzný film na dvě oblasti, jak je znázorněno na Obr. 32. Tlakové gradienty generované v obou těchto oblastech jsou konstantní, tj. **Dp/dx=konstanta**. To podstatně zkracuje výpočty, protože gradienty tlaku mohou být zapsány přímo z Obr. 32. [32]



Obr. 32 Geometrie axiálního ložiska s kapsami [32]

Oblast 1:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_1 = -\frac{p_{max}}{B_1} \quad [Pa \cdot m^{-1}] \quad (10)$$

Oblast 2:

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_2 = \frac{p_{max}}{B_2} \quad [Pa \cdot m^{-1}] \quad (11)$$

p_{max}	[Pa]	maximální tlak
B_1	[m]	šířka 1. oblasti úseku ložiska
B_2	[m]	šířka 2. oblasti úseku ložiska

Dosažením a odvozením dostaneme vztah pro výpočet tlaku generovaného ložiskem.

$$p_{max} = \frac{6U\eta(h_1 - h_0)}{\left(\frac{h_1^3}{B_1} + \frac{h_0^3}{B_2}\right)} \quad [Pa] \quad (12)$$

Únosnost na jednotku délky je dána vztahem:

$$\frac{W}{L} = \frac{1}{2} p_{max} B \quad [N \cdot m^{-1}] \quad (13)$$

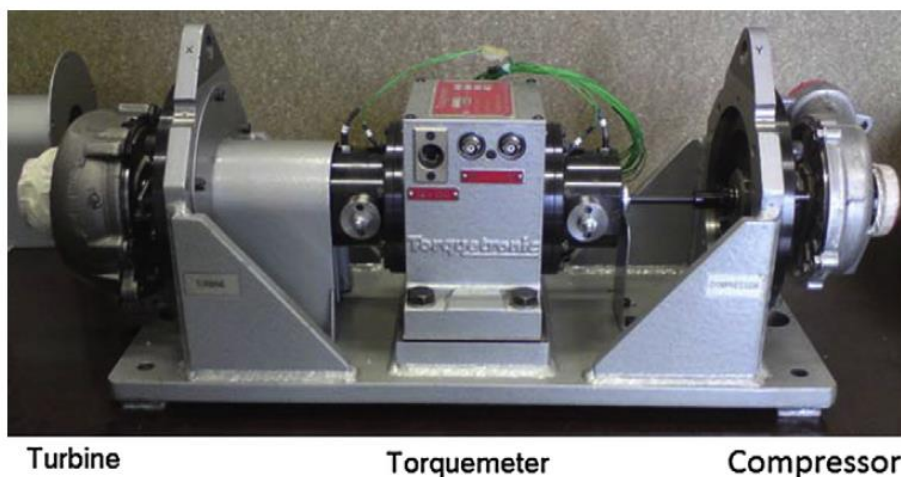
6 EXPERIMENTÁLNÍ METODY

Jak již bylo v předchozích kapitolách zmíněno, uložení rotoru turbodmychadel pomocí aerodynamických ložisek je teprve ve vývojové fázi a informace o metodách testování, případně jejich průběhu jsou přísně utajovaným know-how firem, jež se vývojem této technologie zbývají. Je ovšem velmi zřejmé, že metodika testování a měření určitých parametrů bude obdobná jako u turbodmychadel s konvenčním uložením. Proto v této kapitole budou nastíněny experimentální metody oněch, pravděpodobně shodně testovaných parametrů.

Testování turbodmychadel probíhá v několika fázích. Prvotně se nově navrhnuté turbodmychadlo testuje na takzvaných testovacích stolicích (anglicky Turbocharger test bench), kde jsou prováděny testy v nižších otáčkách s nižším zatížením. Další fází je testování v celém spektru otáček a zatížení. Tyto testy jsou uskutečněny za pomoci speciálních plynových hořáků (anglicky Gas stand). Poslední fází je simulace reálných provozních podmínek. Turbodmychadlo je většinou umístěno přímo na motoru, pro který je navrženo, a je testováno za působení veškerých okolních vlivů, jako například vibrace motoru, pulzace ve výfukovém potrubí, teplotní šoky a podobně. Z důvodu množství informací ke všem těmto fázím testování bude tato kapitola věnována pouze experimentům na testovací stoličce. [33]

6.1 TURBODMYCHADLOVÁ TESTOVACÍ STOLICE

Testovací stolice je speciálně vyvinuté zařízení pro měření výkonu turbodmychadla v nízkých otáčkách. Pomocí ní lze také vytvořit tlakové a teplotní mapy kompresoru či turbíny. Na stoličce je mezi turbínou a kompresorem umístěn speciální měřič krouticího momentu. Turbína je oddělena od kompresoru a vytváří pohon při měření kompresoru, naopak kompresor je při měření turbíny využíván jako brzda. [33]

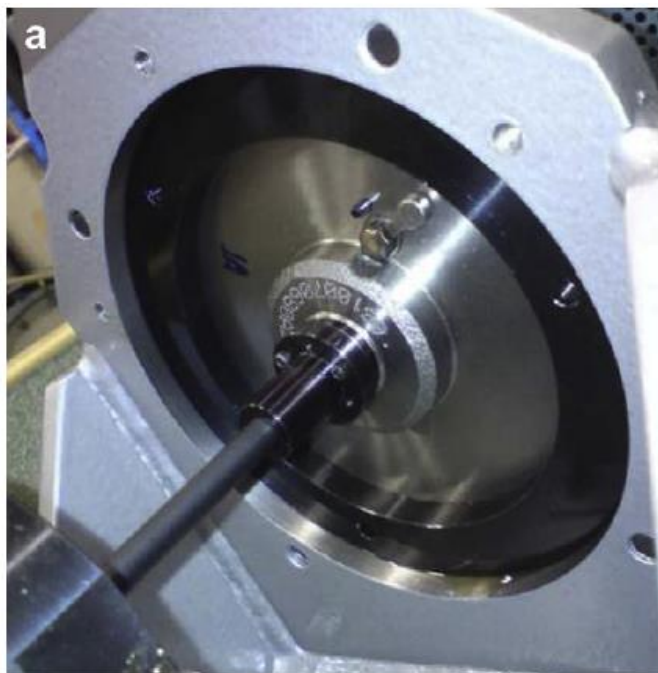


Obr. 33 Turbodmychadlová testovací stolice [33]

6.1.1 MĚŘIČ KROUTÍCÍHO MOMENTU

K nastavení měřiče jsou potřeba dvě turbodmychadla. Na turbínové straně je matice kompresoru nahrazena spojovací součástí. Na straně kompresoru je turbína obrobena, aby vznikla spojovací součást. Ložiskové skříně jsou ponechány na obou stranách, aby se zajistila rotace TD s ložisky. Na obou stranách se přes spojovací součásti nepřenášejí žádné axiální síly. Axiální zatížení ložiska je přesně stejné jako tlakové síly na kole. Měřič momentu je schopen

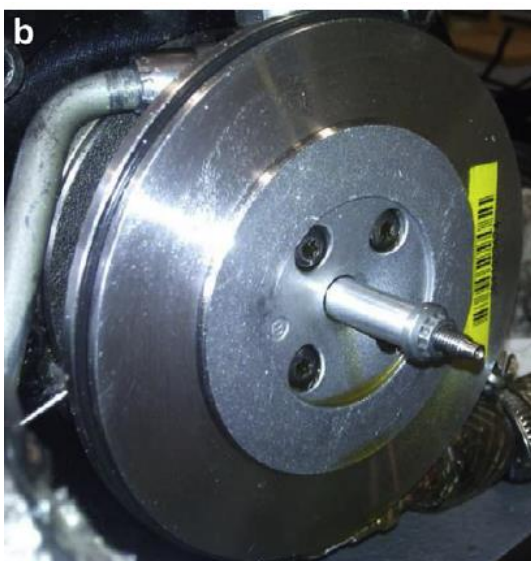
dosáhnout maximálních otáček $120\,000\text{ min}^{-1}$ a maximální moment je $0,4\text{ Nm}$, přesnost měření je $\pm 0,00019\text{ Nm}$. Otáčky jsou měřeny s přesností 1 min^{-1} . [33]



Obr. 34 Spojovací součást měřiče krouticího momentu a kompresoru [33]

6.1.2 MĚŘENÍ TŘECÍCH ZTRÁT

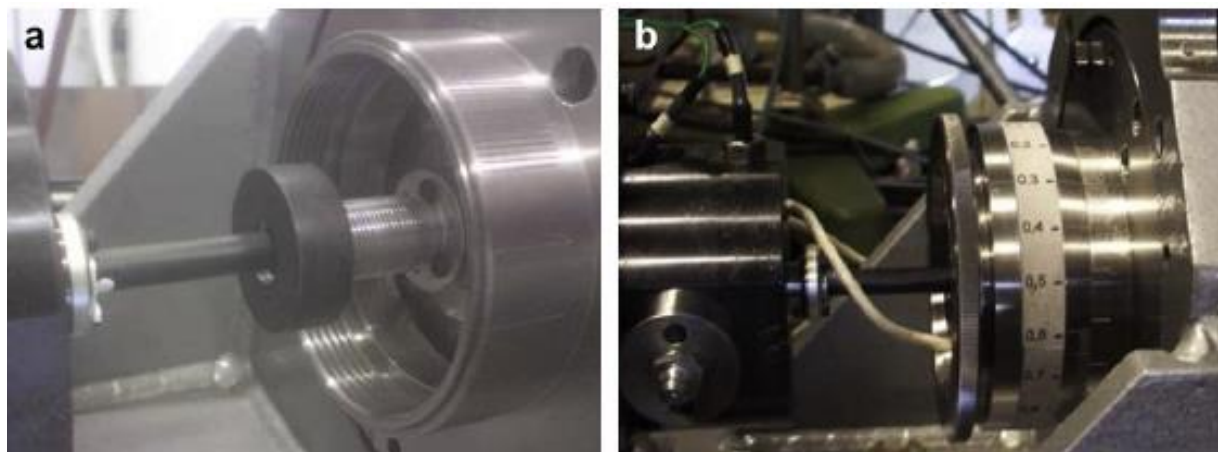
Při běžných podmínkách snímá měřič krouticího momentu moment, který je poskytován turbínou na kompresor a jeho ložiskovou skříň. Při měření třecích sil je kompresorová skříň sundána a kompresorové kolo je nahrazeno distančním válečkem. Takže tlak kompresoru je nulový a změřený moment je stejný jako moment třecích ztrát. Přesnost této metody měření je stejná jako přesnost měřiče momentu. Metoda měření třecích ztrát pomocí měřiče krouticího momentu je přesnější než ostatní metody využívající teplotní měření. [33]



Obr. 35 Kompresorové kolo nahrazené distančním válečkem [33]

6.1.3 MĚŘENÍ AXIÁLNÍHO ZATÍŽENÍ

Pro měření axiálního zatížení na zatíženém ložisku je vytvořeno speciální zařízení s masivním permanentním magnetem, které je připevněno na měřič kroutícího momentu. Spojovací součást mezi kompresorem a měřičem momentu je vyměněna za závitovou spojovací součást z hliníku, na níž je upevněná speciální ocelová, závitová podložka. Poté je těsně vedle podložky umístěn masivní magnetový kroužek. Magnet je namontován na podpěře s vernierovou, neboli noniovou stupnicí a snímačem síly. Obrácením polohy podložky a magnetu na hřídeli lze toto zařízení použít k vyvinutí síly v obou směrech. [33]



Obr. 36 Hliníková spojovací součást s ocelovou podložkou (a) / Magnet s podpěrou a Noniovou stupnicí (b) [33]

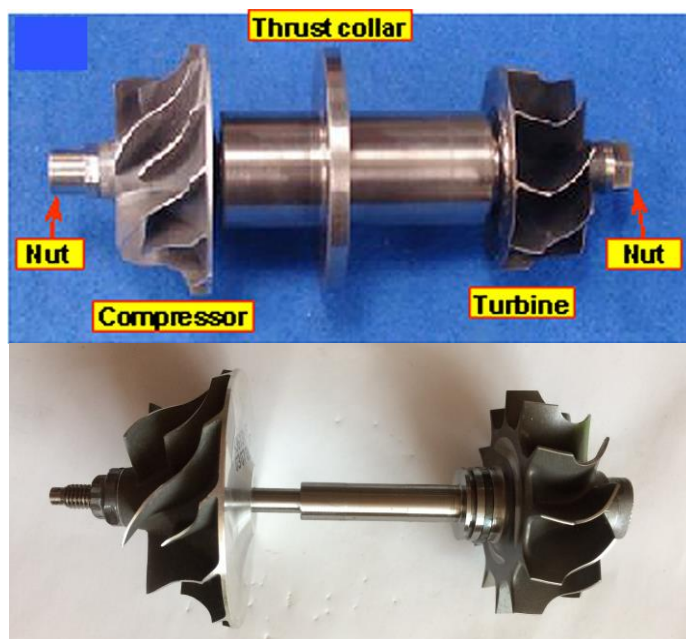
7 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY STÁVAJÍCÍCH TURBODMYCHADEL

V této poslední kapitole budou shrnuty zásadní rozdíly mezi konvenčním uložením rotoru TD a uložením na plynových ložiscích. Dále budou popsány potřebné úpravy stávajících uložení, aby je bylo možno nahradit aerodynamickými ložisky.

Nejčastěji používané uložení je pomocí plovoucích pouzder, tedy kluzná ložiska. Proto je v této kapitole probrána úprava právě tohoto uložení. Nahrazeno bude nejvhodnějším aerodynamickým uložením, a to radiálním LNS ložiskem a axiálním ložiskem se spirálními drážkami, nebo fóliovým axiálním vinutým ložiskem. Potřebné úpravy nastanou převážně v ložiskové skříni, potažmo na hřídeli a jejím uložení. Kompresorová a turbínová skříň zůstanou beze změny, případně dojde k mírné úpravě uchycení na ložiskovou skříň.

7.1 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA ROTORU

Oběžná kola rotoru zůstanou nezměněna, stejně jako skříně, ve kterých jsou umístěna. Největší úpravou projde samotná hřídel, respektive její rotující část ložisek, která musí mít větší průměr z důvodu větších kluzných ploch a obvodových rychlostí, což má pozitivní vliv na únosnost ložiska.



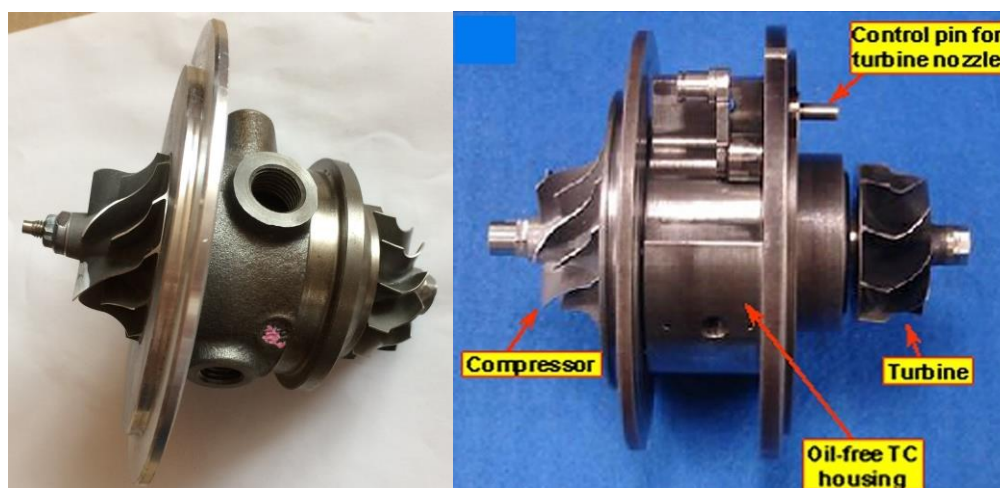
Obr. 37 Rotor s aerodynamickými ložisky / s hydrodynamickými ložisky [34]

Z obrázku 37 lze vidět rozdíl mezi oběma rotory, kde došlo především k významné změně hřídele mezi oběžnými koly. Mezi oběžná kola je tedy umístěna rotující část ložisek, to je možno docílit vyrobením rotoru ložisek jakožto integrální součást hřídele, toho lze dosáhnout například obrobením z jednoho kusu materiálu. Jako druhá pravděpodobnější možnost se jeví vyrobít hřídel a rotor ložisek samostatně a následně obě součásti nerozebíratelně spojit pomocí uložení s přesahem, nebo svařováním třením. Těsnění mezi turbínovou, kompresorovou a ložiskovou částí bude pravděpodobně realizováno labyrintovým těsněním na kluzných plochách radiálního ložiska, případně těsníci kroužky přímo na hřídeli. Tyto zmíněné modifikace lze uplatnit pro všechny tři typy aerodynamických ložisek.

7.2 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVA LOŽISKOVÉ SKŘÍŇE

Výše popsaným změnám rotoru musí být uzpůsobena ložisková skříň. Nejzásadnější úpravou je zvětšení prostoru pro rotor, tedy zvětšení vnitřního průměru skříně. V případě LNS radiálního ložiska je nutné vzít v potaz to, že se do tohoto prostoru musejí umístit také segmenty, jejich podpěry a pružné elementy. Nad každým ze segmentů je potřeba vytvořit otvor se závitem pro umístění podpěr, na nichž jsou segmenty uchyceny. V případě obou typů axiálních ložisek je drážka stejná jako u axiálních kluzných ložisek, změna nastává pouze v ložiskové vůli, která je pro každý typ ložiska mírně odlišná.

Další změnou oproti konvenční ložiskové skříně je odstranění mazacích kanálů a kanálů pro chladicí kapalinu. Ovšem z důvodu vysokého tepla jdoucího od turbínové části je chlazení ložisek velice důležitým faktorem. To lze uskutečnit několika způsoby, pro náš případ je nejvhodnější přivedení tlakového vzduchu do prostoru ložisek, který je odebrán z okruhu sání za intercoolerem. Vývod teplého vzduchu je napojen do potrubí sání před kompresor turbodmychadla, čímž je zajištěn tlakový spád a stabilní proudění chladicího vzduchu. Pro tento způsob je potřeba v ložiskové skříně vytvořit vstupní a výstupní kanál a také vedení chladicího vzduchu. Na obrázku 38 je možno vidět rozdíl ve velikosti a konstrukci ložiskové skříně pro kluzná a aerodynamická ložiska.



Obr. 38 Ložisková skříň s kluzným uložením / s aerodynamickým uložením. [34]

8 ZÁVĚR

Uložení rotoru turbodmychadla na aerodynamických ložiscích má vzhledem ke své konstrukci obrovský potenciál ve zjednodušení konstrukce, snížení třecích ztrát, či zvýšení otáček rotoru. To může mít pozitivní vliv na zlepšení efektivity přepřínování, což vede ke zvýšení výkonu TD, nebo ke zmenšení jeho rozměrů, tedy k úspoře materiálu a místa, při zachování výkonu.

Dle názoru autora této práce je daná problematika hlavně otázkou blízké budoucnosti a rychlosti vývoje společností zabývajících se touto technologií. Ovšem je nutno říci, že použití aerodynamických ložisek skýtá také určitá omezení.

Je zřejmé že, dojde k významnému nárůstu průměru hřídele turbodmychadla. To způsobí navýšení momentu setrvačnosti v ose rotoru, což zapříčiní pomalejší přechody v tranzientních režimech. Záleží tedy na dané aplikaci, bude-li tato technologie užita u velkých lodních, nebo stacionárních motorů, či u motorů nákladních automobilů, nemělo by dojít k výrazným problémům, jelikož tranzientních režimů je v těchto případech jen minimum. Ale dojde-li k aplikaci těchto turbodmychadel u motorů osobních automobilů, kde je rychlost přechodů v tranzientních režimech klíčová, bude záležet pouze na šikovnosti konstruktérů, jak se s tímto problémem dokáží vyrovnat.

SOUHRN

V úvodní kapitole byla stručně probrána historie turbodmychadel, která se nejprve uplatňovala ve velkých lodních a kamionových motorech. Po dalším vývoji se postupně aplikovala v motorsportu, kde prožila svou éru zejména v 90. letech 20. století. Turbodmychadla se nakonec uplatnila také v osobních automobilech, převážně ve vznětových agregátech a později i v zážehových pohonných jednotkách. Turbodmychadla jsou nejčastějším způsobem přeplňování spalovacích motorů a jsou v čím dál větší míře používána dodnes.

Následující část je věnována principu fungování a konstrukci turbodmychadla. Byla zde vysvětlena prodleva turbodmychadla (tzv. turboefekt) a také regulace tlaku, která je realizována obtokovým ventilem, anglicky Waste Gate ventilem, nebo pomocí variabilní geometrie lopatek VNT, či VGT. Dále byla popsána konstrukce jednotlivých částí a také TD jako celku. Nejdůležitější částí je ložisková skříň, která ukrývá uložení rotoru. To je realizováno kluznými, či valivými kapalinou mazanými ložisky, nebo aerodynamickými ložisky.

V kapitolách 4, 5 a 6 je popsána podrobná konstrukce a typy aerodynamických ložisek, jejich aplikace, či konkrétní použití, nastínění základních výpočtů a metodika testování prototypových turbodmychadel. Nejpodrobněji jsou popsána radiální ložiska LNS, která existují v několika modifikacích a jsou v současnosti nejvhodnější pro vysokorychlostní, tepelně zatěžované aplikace. Z axiálních ložisek jsou podrobněji popsána fóliová vinutá ložiska a ložiska se spirálními drážkami. Stejně jako je druhů aerodynamických ložisek, je také nepřeberné množství jejich aplikací. Jedna z nich je například turbochladič letecké klimatizační jednotky. Ve výpočtové části jsou uvedeny základní vztahy zejména pro výpočet LNS ložisek a také axiálních ložisek s kapsami. Jako jedna z experimentálních metod je uvedeno testování TD na testovacích stolicích.

Poslední kapitola se zabývá potřebnými konstrukčními úpravami současných konvenčních ložisek TD pro možnou aplikaci aerodynamických ložisek. Jsou zde popsány veškeré konstrukční rozdíly a úpravy. Největší nutná úprava nastává v ložiskové skříni, jejíž konstrukce je značně odlišná od ložiskové skříně s kluznými kapalinovými ložisky.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ENERGY - ECOLOGY S.R.O., . *Historie vývoje turbodmychadel* [online]. 2008 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <http://turbodmychadla.webnode.cz/historie/>
- [2] HEBRICH, Richard. *Turba a kompresory - o co vlastně jde?* [online]. 2012 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <http://www.autoweb.cz/turba-a-kompresory-o-co-vlastne-jde/>
- [3] Turbodmychadlo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2004 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Turbodmychadlo>
- [4] In: *Turbodmychadla.wbs.cz* [online]. 2016 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.turbodmychadla.wbs.cz/>
- [5] ENERGY - ECOLOGY S.R.O., . Jak funguje turbodmychadlo. In: *Energy-ecology.cz* [online]. 2008 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <http://turbodmychadla.webnode.cz/jak-funguje/>
- [6] LÁNÍK, Ondřej. *Přepřínování (2. díl): turbodmychadla* [online]. 2004 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/preplnovani-2-dil-turbodmychadla-16765>
- [7] MILLER, Jay. *Turbo: real world high-performance turbocharger systems*. North Branch: MN:CarTech, 2008, s. 160. ISBN 978-1-932494-29-7.
- [8] Wastegate bypass regulator valve. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2007 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: https://s4wiki.com/wiki/Wastegate_bypass_regulator_valve
- [9] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily 7 - Diagnostika motorových vozidel*. 7. Brno: Avid, spol. s r.o., 2012, s. 195. ISBN 978-80-87143-21-6.
- [10] HONEYWELL, . *VNT™ Turbochargers* [online]. b.r. [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <https://turbo.honeywell.com/our-technologies/vnt-turbochargers/>
- [11] FRANC, Vladimír. *Vývoj turbodmychadel spalovacích motorů*. Brno, 2016, s. 60. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Kamil Řehák.
- [12] FRYŠČOK, Tomáš. *Dynamika rotorů moderních turbodmychadel*. Brno, 2013, s. 41. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Václav Píštěk DrSc.
- [13] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily 3 - motory*. 5. Brno: Avid, spol. s r.o., 2008, s. 179. ISBN 978-80-87143-06-3.

- [14] MOTOR-TUNING, . Řez automobilovým turbodmyčadlem. In: *Www.afroi.cz* [online]. 2017 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <http://www.afroi.cz/turba/turba.htm>
- [15] HOFMANN, Karel. *Turbodmychadla, vozidlové turbíny a ventilátory: přepřehování spalovacích motorů*. Vyd. 2., nezměn. Brno: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985, 134 s. : il., tabulky, grafy.
- [16] C&E TURBOCHARGERS BV, . In: *Www.turbochargers.nl* [online]. Amersfoort, 2017 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <https://www.turbochargers.nl/turboshop/turbo/5304-970-0033.html>
- [17] BORG WARNER EFR 7670 TURBOCHARGER. In: *Http://www.6starspeed.com* [online]. 2011-2013 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.6starspeed.com/bowaefr76tu.html>
- [18] Kompresorové kolo turbodmychadla. In: *Http://www.autocarro.cz* [online]. 2011 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.autocarro.cz/eshop/zbozi/kompresove-kolo-84>
- [19] HONEYWELL, . *Garrett by Honeywell Ball Bearing Turbochargers* [online]. 2013 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <https://garrett.honeywell.com/about/turbo-bulletin/tech-corner/garrett-by-honeywell-ball-bearing-turbochargers/>
- [20] HONEYWELL, . *Ball Bearing* [online]. 2017 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <https://turbo.honeywell.com/our-technologies/ball-bearing/>
- [21] Ball Bearings in Turbochargers: Great for Cars. Not So Good for Aircraft. In: *Http://hartzell.aero* [online]. 2016 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://hartzell.aero/article/ball-bearings-in-turbochargers-great-for-cars-not-so-good-for-aircraft/>
- [22] ŠIMEK, Jiří. *Kluzná ložiska a uložení rotorů: Uložení a dynamika rotoru turbodmychadel* [online]. 2012 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/cs/loziska.html>
- [23] ENGINEERING PROCESS: Bearing Study. In: *Http://xcargot.com* [online]. 2017 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://xcargot.com/technology/>
- [24] SPECIALTY COMPONENTS, . *Introduction to Air Bearings* [online]. 2017 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.specialtycomponents.com/Resources/Technical-Articles/Introduction-to-Air-Bearings/>
- [25] Air bearing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2016 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Air_bearing
- [26] ŠIMEK, Jiří. *Kluzná ložiska a uložení rotorů: Vlastnosti aerodynamických ložisek* [online]. 2012 [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/cs/VlastAerodLoz.pdf>

- [27] BALDUCCHI, Franck, Mihai ARGHIR a Romain GAUTHIER. Experimental Analysis of the Dynamic Characteristics of a Foil Thrust Bearing. In: *JOURNAL OF TRIBOLOGY* [online]. ASME, 2014 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://tribology.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=2107668>
- [28] ŠIMEK, Jiří. *Engineering Mechanics: APPLICATION OF A NEW TYPE OF AERODYNAMIC TILTING PAD JOURNAL BEARING IN POWER GYROSCOPE* [online]. 19. Association for Engineering Mechanics, 2012 [cit. 2017-03-28]. ISSN 1805-4633. Dostupné z: http://www.engineeringmechanics.cz/pdf/19_5_359.pdf
- [29] ŠIMEK, Jiří. *Kluzná ložiska a uložení rotorů: Aplikace aerodynamických ložisek* [online]. 2012 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://www.techlab.cz/cs/AplAerodLoz.pdf>
- [30] *Catalog of CHP Technologies: Section 5. Technology Characterization – Microturbines* [online]. In: . 2015, s. 1-20 [cit. 2017-03-29].
- [31] Get Your Bearings Straight. In: *Turbomachinerymag.com* [online]. 2014 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <https://www.turbomachinerymag.com/get-your-bearings-straight/>
- [32] W. STACHOWIAK, Gwidon a Andrew W. BATCHELOR. *ENGINEERING TRIBOLOGY* [online]. 3. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005 [cit. 2017-04-27]. ISBN 0-7506-7836-4.
- [33] Experimental identification of turbocharger mechanical friction losses. DELIGANT, M., P. PODEVIN a G. DESCOMBES. *Energy: Sustainable Energy and Environmental Protection 2010* [online]. 39. Paris, 2012, 388–394 [cit. 2017-04-29].
- [34] LEE, Yong-Bok, Suk KWON, Tae HO KIM a Kyuho SIM. Feasibility Study of an Oil-Free Turbocharger Supported on Gas Foil Bearings Via On-Road Tests of a Two-Liter Class Diesel Vehicle. In: *Asmedigitalcollection.asme.org* [online]. 2012 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1688947>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CO ₂	Oxid uhličitý
ALS	Anti lag system
FL	Fóliová ložiska
LNS	Ložisko s naklápěcími segmenty
REA	Rotary Electric Actuator
TD	Turbodmychadlo
VGT	Variable-geometry turbocharger
VNT	Variable nozzle turbine